



TAMPEREEN TEKILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHA-MATTI KETO
TERÄSRKENTEIDEN LIITOKSET JA LIITOSTEN KIERTYMIS-
JÄYKKYYDEN VAIKUTUS KEHÄRKENTEESSEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Markku Heini-
suo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Rakennustekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 4. toukokuuta
2016

TIIVISTELMÄ

JUHA-MATTI KETO: Teräsrakenteiden liitokset ja liitosten kiertymäjäykkyyden vaikutus kehärakenteeseen
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 49 sivua, 0 liitesivua
Toukokuu 2016
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Rakennesuunnittelu
Tarkastaja: professori Markku Heinisuo

Avainsanat: teräsrakenteet, liitokset, kiertymäjäykkyys, kehärakenne

Teräsrakenteiden suunnittelussa rakennesuunnittelija joutuu ottamaan huomioon useita eri seikkoja jotka ohjaavat suunnittelutyön etenemistä ja vaikuttavat suunnittelutyön lopputulokseen. Euroopassa käyttöön otetut Eurokoodit antavat reunaehdot mitoitus-työlle alkaen kuormituksista aina yksityiskohtaisiin rakenneosien mitoitusohjeisiin. Eurokoodit on hyvin laaja kokonaisuus standardeja, joissa on viittauksia muihin standardeihin. Taitava suunnittelija joutuu hallitsemaan suuren määrän eri standardeja ja mää- räyksiä jotta suunnittelutyö on yleensä mahdollista. Lisäksi tarvitaan vahvaa sovelta- miskykyä jotta taloudellisia ja käytännöllisiä rakenteita on mahdollista suunnitella.

Rakennesuunnittelussa taloudellisen rakenteen saavuttamiseksi merkittävä seikka on koko rakenteen analyysimallissa käytettävät liitosten kiertymäjäykkyydet. Usein suunnittelijat ovat tottuneet oletamaan sauvojen väliset liitokset nivelellisiksi, jolloin niillä ei ole lainkaan kykyä siirtää momenttia. Tämä on helppo ja suoraviivainen tapa rakentaa laskentamalli, ja tiettyjen reunaehtojen täytyessä usein täysin hyväksyttävä tapa toimia. Kuitenkin hyvin yksinkertaisilla liitosdetaljeilla on mahdollista saada liitokselle jonkin verran kiertymäjäykkyyttä, jolla on useimmiten edullinen vaikutus koko rakenteen voi- masuureiden jakautumiseen ja siten myös sauvojen mitoitukseen.

Tässä työssä on käsitelty liitosten suunnittelua ohjaavia standardeja siten että aluksi on käsitelty liitosten suunnittelua ohjaavaa standardijärjestelmää ja luetteloimalla tärkeim- piä teräsrakenteiden suunnittelussa tarvittavia standardeja. Sen lisäksi liitoksissa käytet- tävistä tuotteista, pääasiassa ruuvikokoonpanoista, on koottu standardien pohjalta tietoa. Liitosten komponenttien mitoitusta on esitetty myös.

Tärkeimpänä osana tässä työssä on käsitelty liitosten kiertymäjäykkyyden vaikutusta koko rakenteen analyysimallin rakentamisessa ja laskemisessa. Kiertymäjäykkyyden mallintaminen eri analyysityypeissä on käsitelty sekä esitetty perusteita nivelellisen rakennemallin käyttöön. Lopuksi on tehty yhdelle kehälle vertailulaskelmia käyttäen eri liitostyyppejä. Tästä tuloksena on saatu että joustavien liitosten käyttäminen johtaa ta- loudelliseen rakenteeseen. Samalla liitosten detaljiikka on mahdollista pitää kohtuulli- sen yksinkertaisena, jolloin rakenteen kokonaiskustannuksissa saavutetaan optimaalinen ratkaisu.

ABSTRACT

JUHA-MATTI KETO: Steel structures joints and influence of joints rotational stiffness on frame

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 49 pages, 0 Appendix pages

May 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Markku Heinisuo

Keywords: steelstructures, joints, rotational stiffness, frame

Structural engineer has to take care of various matters when designing steel structures. Those matters have an influence on proceeding of design work and final result. In Europe Eurocodes have been taken in practice, and those give boundary conditions for designing starting from loadings and ending up to the detail dimensioning. Eurocodes are a wide collection of standards including references to other standards. Skilled designer has to know lot of standards and regulations to be able to do design work. In addition, tough skill to apply is needed to make design of cost-effective and useful structures.

In construction design process to achieve a cost-effective structure an important thing is stiffnesses of joints in analysis model. Design engineers are often used to assume joints as pinned, with not capacity for moments. This is an easy and straightforward way to construct the calculation model, and with certain regulations often fully acceptable way to act. However, with very simple joint details, it is possible to achieve moment resistance. Moment resistance in joints have often positive influence on distribution of moments in the structure, and on dimensioning of bars.

In this Master of Science Thesis standards regulating the design of steel structures joints are treated, first treating the standard system and presenting most important standards. Moreover, information of screw assemblies is gathered from standards and presented. Dimensioning of joints components are presented also.

The most important part in the Thesis is introduction of joints rotational stiffnesses influence on the analysis model of the whole structure. Adopting rotational stiffness in various analysis types is covered, and justification of using hinged joints. Finally one steel frame is analysed using different types of joints, leading to the conclusion that partially rigid joints can offer cost-efficient solution. At the same time, joint details are possible to keep quite simple.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opintovapaani aikana loppuun jo aiemmin aloittamaani työtä jatkamalla ja jalostamalla.

Haluan esittää kiitokseni professori Markku Heinisuoille työn rakenteen ja sisällön kannalta tärkeistä neuvoista sekä työn ohjauksesta.

Lopuksi haluan esittää kiitokseni vaimolleni Eveliinalle, joka on jaksanut olla tukena opiskelujeni loppuun saattamisessa sekä tämän diplomityön tekemisen aikana.

Tampereella, 23.5.2016

Juha-Matti Keto

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LIITOKSIA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET	2
2.1	Viitestandardit	2
2.2	Varmuuskertoimet, kuormitukset ja muut perusolettamukset	4
2.3	Kiinnikkeet	5
2.3.1	Ruuvit, esijännittämättömät ruuvikokoonpanot	5
2.3.2	Mutterit, esijännittämättömät kokoonpanot	8
2.3.3	Aluslevyt, esijännittämättömät kokoonpanot	9
2.3.4	Esijännittämättömät ruuvikokoonpanot	10
2.3.5	Esijännitetyjen ruuvikokoonpanojen kiinnikkeet	11
3.	LIITOSTYYPPIEN LUOKITTELU EUROKOODIN MUKAAN	15
3.1.1	Liitosten luokittelu toimintatavan mukaan	15
3.1.2	Liitosten luokittelu lujuuden mukaan	16
3.1.3	Liitosten luokittelu jäykkyyden mukaan	17
4.	RAKENTEIDEN ANALYYSI	18
4.1	Koko rakenteen analysointi eri liitostyypeillä	18
4.2	Osittain jäykän liitoksen mallintaminen nivelenä rakennemalliin	20
5.	LIITOSKOMPONENTIT JA NIIDEN OMINAISUUDET JA MITOITUS	21
5.1	Ruuvikiinnitykset	21
5.1.1	Ruuvien leikkautuminen	21
5.1.2	Ruuvien vetokestävyys	24
5.1.3	Ruuvien yhdistetty leikkaus- ja vetokestävyys	26
5.1.4	Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys	27
5.1.5	Reunapuristuskestävyys	27
5.1.6	Palamurtuminen	28
5.2	Hitsauskiinnitykset	28
5.3	Muut liitosten komponentit	29
6.	LIITOKSEN KIERTYMISJÄYKKYYS	30
7.	LIITOSTEN VALMISTUS JA ASENNUS	32
8.	LIITOKSEN KIERTYMISJÄYKKYYDEN VAIKUTUS KEHÄRAKENTEeseen	34
8.1	Kehä rakenteen laskenta	34
8.1.1	Nivelellinen rakennemalli	36
8.1.2	Joustavien liitosten rakennemalli	37
8.1.3	Kehitetty joustavien liitosten rakennemalli	39
8.1.4	Täysin jäykkä rakennemalli	42
8.1.5	Täysin jäykkä rakennemalli, jossa käytetty todellisia kiertymäjäykkyyksiä liitoksille	44
9.	YHTEENVETO	46

LÄHTEET.....	49
--------------	----

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α_{cr}	Tekijä jolla mitoituskuorma kerrotaan, jotta saavutetaan kimmoteorian mukainen kokonaisstabiiliuden menetys
β_w	Korrelaatiokerroin hitsin lujuudelle, kts Taulukko 10
η	Liitoksen jäykkyyden muunnostekijä
γ_{M2}	Ruuvien kestävyys osavarmuuskerroin. Kansallisesti valittava parametri, eurokoodin suositus ja Suomessa käytettävä arvo on 1,25.
A	Ruuvien varren kierteettömän osan poikkipinta-ala
A_s	Ruuvien varren kierteettömän osan poikkipinta-ala
A_{nt}	Vedon rasittaman poikkileikkauksen nettopinta-ala
A_{nv}	Leikkauksen rasittaman poikkileikkauksen nettopinta-ala
$B_{p,Rd}$	Ruuvien lävistymiskestävyys mitoitusarvo
CEN	European Committee for Standardization
d	Ruuvien nimellishalkaisija
d_0	Ruuvien reiän nimellishalkaisija
d_m	Pienin seuraavista arvoista: ruuvien kannan etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo tai mutterin etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo
e_1	Ruuvien reiän keskiön ja viereisen rakenneosan päädyn välinen päätyetäisyys mitattuna siirrettävän voiman suunnassa
e_2	Ruuvien reiän keskiön ja viereisen rakenneosan reunan välinen reunaetäisyys mitattuna kohtisuoraan siirrettävään voimaan nähden
E	Teräksen kimmokerroin
EXC1...4	Execution class, teräsrakenteiden toteutusluokka
I_b	Palkin hitausmomentti
$F_{b,Rd}$	Ruuvien reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo
F_{cr}	Rakenteen kimmoiseen alkujäykkyyteen perustuva kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma, joka vastaa rakenteen kokonaisstabiiliuden merkitystä
F_{Ed}	Rakenteen mitoituskuorma
$F_{t,Ed}$	Ruuvien vetovoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
$F_{t,Rd}$	Ruuvien vetokestävyys mitoitusarvo
$F_{v,Ed}$	Ruuvien leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
$F_{v,Rd}$	Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo
f_u	Teräksen murtolujuus
f_{ub}	Ruuvien materiaalin murtolujuus
$f_{vw,d}$	Hitsin jännitys
ISO	International Organization for Standardization
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
L_b	Palkin pituus
p_1	Vierekkäisten ruuvien reikien keskiöiden etäisyys siirrettävän voiman suunnassa
p_2	Vierekkäisten ruuvien reikien keskiöiden etäisyys siirrettävään voimaan vastaan kohtisuorassuunnassa
$S_{j,ini}$	Liitoksen alkukiertymäjäykkyys
S_j	Liitoksen kiertymäjäykkyys
t_p	Osien paksuus, josta ruuvi lävistyy

t	Levyn paksuus
τ_{\perp}	Hitsin akselia vastaan kohtisuora leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa)
τ_{\parallel}	Hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa)
$V_{eff,1,Rd}$	Liitoksen palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo keskeisellä kuormalla
$V_{eff,2,Rd}$	Liitoksen palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo epäkeskeisellä kuormalla
σ_{\perp}	Hitsin laskentapintaa vastaan kohtisuoraan oleva jännitys

1. JOHDANTO

Suomessa käytetään teräsrakenteiden mitoituksessa pääsääntöisesti Eurocode 3 mukaisia mitoitusmenetelmiä. Monilla yrityksillä on käytössä mitoitusohjelmia jotka mitoittavat rakenteiden sauvat (palkit, pilarit) EC3:n mukaan. Liitosten mitoituksessa täytyy tällöin käyttää myös saman järjestelmän mitoitusmenetelmiä. Liitosten mitoitus ja toteutus Eurocode 3:n mukaan on tuonut muutoksia totuttuihin käytäntöihin kun kansallisia menetelmiä ei voida käyttää. Nämä muutokset ovat suunnittelijat joutuneet omaksumaan suunnittelutyössään.

Eurokoodien mukaiseen rakenteiden mitoitukseen siirryttäessä liitosten ominaisuudet vaikuttavat myös koko rakenteen analysointiin. Tämä asia on eurokoodeissa kerrottu selkeästi. Eurokoodit tunteva kolme erilaista liitostyyppiä; nivelliitos, jäykkä liitos sekä osittain jäykkä liitos. Eurokoodi luokittelee liitoksia myös lujuuden perusteella, mutta tämä luokitus ei ole tavanomaiseen teräsrakennesuunnitteluun merkittävä koska tähän luokitukseen liittyy koko rakenteen analysoiminen plastisuusteorian mukaan. Perinteisesti Suomessa on ajateltu rakenteita analysoitaessa että liitokset ovat vain nivelliitoksia tai jykkiä. Myös eurokoodien mukaan mitoittaessa voidaan rakenteissa olevat liitokset yleensä mallintaa pelkästään nivelliitoksina tai jykkinä liitoksina. Liitosten sitkeyteen ja kiertymäkykyyn kiinnitetään kuitenkin enemmän huomiota.

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia liitosten mitoitusmenetelmät Eurocode 3:n mukaan ja tuottaa mahdollisimman selkeitä ohjeita Suomessa yleisesti käytössä olevien liitosten mitoitukseen. Erityistä huomiota kiinnitetään liitosten mallintamiseen koko rakenteen rakennemalliin, ja siihen että vastaako nykyinen tapa mallintaa suurin osa liitoksista nivelenä myös Eurokoodien suunnitteluperusteisiin ja minkälaisiin liitoksiin tulee käyttää osittain jykkiä liitoksia.

Tämä diplomityö on rajattu koskemaan ainoastaan teräsrakenteiden liitoksia ja liitosten vaikutuksia kokonaiseen rakenteisiin. Eurocode 3:ssa on useita osia joista liitosten mitoitus on vain yksi osa. Myöskään kuormien laskemiseen ei perehdytä tässä työssä. Esimerkiksi pelkästään tuulikuormien tarkempi tutkiminen on jo oma luku sinänsä.

Työn lopputuloksena on yleiskatsaus liitosten mitoitusta ohjaaviin standardeihin ja käytettäviin kiinnikkeisiin sekä liitosten mitoitukseen. Lisäksi liitosten kiertymäjäykkyyden vaikutusta kokonaiseen kehärakenteeseen on käsitelty tarkemmin.

2. LIITOKSIA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET

2.1 Viitestandardit

Teräsrakenteiden suunnittelun ja valmistuksen ohjaukseen on luotu ohjausjärjestelmä, Eurokoodit, joka koostuu suuresta määrästä eri standardeja. Standardeja ja järjestöjä jotka luovat standardeja on maailmanlaajuisia, eurooppalaisia sekä kansallisia. Teräsrakentamisessa eurooppalaisesta näkökulmasta katsottuna merkittävimmät järjestöt ovat seuraavat:

1. ISO, International Organization for Standardization, maailmanlaajuinen standardisomisjärjestö (standardin etuliitteenä ISO)
2. CEN, European Committee for Standardization, eurooppalainen järjestö (standardin etuliitteenä EN)
3. SFS, Suomen Standardisoimisliitto, Suomen kansallinen järjestö (standardin etuliitteenä SFS)

Perusajatus standardeissa on, että mikäli esim. ISO määrittää jonkun standardin, on tämä standardi hyväksyttävä voimassa olevaksi kaikissa ISO:n jäsenmaissa. Sama koskee muita standardisomisjärjestöjä.

Teräsrakenteiden suunnittelija täytyy hallita perusasiat Eurokoodeista ja sen viitestandeista. Vaatimustaso standardien hallitsemiselle nousee suunniteltavan kohteen vaativuuden lisääntyessä. Suunnittelija saattaa joutua selvittämään jonkin yksittäisen rakenneosan mitoituksen perusteita tai käytettyjen valmisosien soveltuvuutta kyseessä olevaan kohteeseen. Standardien tunteminen ei yksinään pelkästään riitä vaan tarvitaan perustiedot mm. lujuusopista ja rakenteiden mekaniikasta. Standardien tunteminen alkaa nykyään olla kuitenkin välttämätön vaatimus menestyvälle teräsrakenteiden suunnittelijalle.

Rakennusosalalle luotu Eurokoodi-järjestelmä on Eurooppalaisen CENnin tuottama. Kaikki CENin jäsenmaat (28kpl) ovat velvollisia vahvistamaan Eurokoodit joka tarkoittaa käytännössä sitä, että kaikissa em. maissa voidaan esimerkiksi teräsrakenteet suunnitella Eurokoodien ohjeiden mukaan. Tämä luonnollisesti helpottaa vapaata kilpailua Euroopan alueella.

Eurokoodi 3 käsittelee teräsrakenteiden suunnittelua. EN 1993-1 määrittää yleiset säännöt teräsrakenteiden mitoituksille. Siinä on 12 osaa, EN 1993-1-1... EN 1993-1-12. Li-

säksi on olemassa standardit EN 1993-2...EN1993-6. Nämä osat täydentävät EN 1993-1 sääntöjä (sillat, mastot, siilot yms.)

Eurokoodeissa viitataan useissa kohdissa viitestandardeihin joiden mukaisia käytettävät materiaalit, tuotteet, valmistustavat ja rakenteiden toteutus täytyy olla. Liitossuunnittelun ja liitosten toteutuksen osalta tärkeitä viitestandardeja ovat [3]:

Ryhmä 1: Hitsattavat rakenneteräksset

- SFS-EN 10025-1, Kuumavalssatut rakenneteräksset. Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot.
- SFS-EN 10025-2, Kuumavalssatut rakenneteräksset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräksset. Tekniset toimitusehdot.
- SFS-EN 10025-3, Kuumavalssatut rakenneteräksset. Osa 3: Normalisoidut ja normalisointivalssatut hitsattavat hienoraerakenneteräksset. Tekniset toimitusehdot.
- SFS-EN 10025-4, Kuumavalssatut rakenneteräksset. Osa 4: Termomekaanisesti valssatut hitsattavat hienoraeteräksset. Tekniset toimitusehdot.
- SFS-EN 10025-5, Kuumavalssatut rakenneteräksset. Osa 5: Ilmastokorroosiota kestävät rakenneteräksset. Tekniset toimitusehdot.
- SFS-EN 10025-6, Kuumavalssatut rakenneteräksset. Osa 6: Nuorrutetut lujat levytuotteet. Tekniset toimitusehdot.

Ryhmä 2: Toleranssit, mitat ja tekniset toimitusehdot

- SFS-EN 10029, Kuumavalssatut teräslevyt, paksuus 3mm tai yli. Mitta-, muoto- ja painotoleranssit
- SFS-EN 10034, I- ja H-rakenneteräsprofiilit. Mitta- ja muototoleranssit.
- SFS-EN 10051, Kuumavalssattu pinnoittamaton nauhalevy ja nauha seostamattomasta ja seosteräksestä. Mitta- ja muototoleranssit.
- SFS-EN 10055, Kuumavalssatut tasakylkiset viistolaippaiset T-teräsprofiilit. Mitat ja mitta- ja muototoleranssit.
- SFS-EN 10056-1, Tasa- ja erikylkiset rakenneteräskulmaprofiilit. Osa 1: Mitat
- SFS-EN 10056-2, Tasa- ja erikylkiset rakenneteräskulmaprofiilit. Osa 2: Mitta- ja muototoleranssit
- SFS-EN 10164, Terästuotteet parannetuin paksunnetuin murtokuroumaominaisuuksin. Tekniset toimitusehdot

Ryhmä 3: Rakenneputket ja –putkipalkit

- SFS-EN 10210-1, Kuumamuovatut seostamattomat rakenne- ja hienoraerakenneteräsputkipalkit. Osa 1: Tekniset toimitusehdot
- SFS-EN 10210-2, Kuumamuovatut seostamattomat rakenne- ja hienoraerakenneteräsputkipalkit. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet
- SFS-EN 10219-1, Kylmämuovatut hitsatut seostamattomat rakenne- ja hienoraerakenneteräsputkipalkit. Osa 1: Tekniset toimitusehdot

- SFS-EN 10219-2, Kylmämuovatut hitsatut seostamattomat rakenne- hienoraerakenneteräsputkipalkit. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet

Ryhmä 4: Ruuvit, mutterit ja aluslaatat

- SFS-EN 20898-2, Kiinnityselimien lujuusominaisuudet. Osa 2: Mutterit. Metrin kierre
- SFS-EN 20286-2, ISO-toleranssi- ja sovitejärjestelmä. Osa 2: Reikien ja akselien perustoleranssiasteiden ja rajaeromittojen taulukot

Ryhmä 5: Hitsausaineet ja hitsaus

- SFS-EN ISO 15614-1, Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkeliseosten kaarihitsaus
- SFS-EN ISO 17659, Hitsaus. Hitsausliitosten monikielinen kuvallinen sanasto
- SFS-EN ISO 5817, Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sula-hitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat
- SFS-EN ISO 13918, Hitsaus. Tapit ja keraamiset renkaat kaaritapitushitsaukseen
- SFS-EN ISO 14555, Hitsaus. Metallisten materiaalien kaaritapitushitsaus

Ryhmä 7: Teräsrakenteiden toteutus

- SFS-EN 1090-2, Teräs- ja alumiinirakenteiden toteuttaminen. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.

Viitestandardeja on todella paljon, ja standardeissa on vielä viittauksia toisiin standardeihin joita ei ole luettelossa. Luettelo ei sisällä kaikkia tarvittavia standardeja vaan vain useimmiten tarvittavat.

2.2 Varmuuskertoimet, kuormitukset ja muut perusolettamukset

Teräsrakenteet, niiden liitokset ja kaikki muutkin rakenteet tulee suunnitella siten, että ne täyttävät vaaditut kriteerit käyttöaikanaan. Kriteereitä ovat kestävyys, käyttökelpoisuus ja säilyvyys. Liitosten osalta kestävyys ja käyttökelpoisuus tarkoittavat käytännössä liitoksen kestävyyttä murtorajatilassa vaikuttaville kuormille. Myöskään käyttörajatilassa tapahtuvaa plastista myötäämistä ei saisi tapahtua. Tämä jää kuitenkin monesti suunnittelijoilta huomioimatta käytännön suunnittelutyötä tehtäessä.

Teräsrakenteiden liitoksia suunniteltaessa ei tarvitse syvällisesti miettiä vaadittuja luotettavuustasoja lähtötietojen ollessa tarkkoja. Jos mitoituskuormat ovat annettu, riittää kun tietää kuormat ja toteutusluokan. Toteutusluokkia ovat EXC1, EXC2, EXC3, EXC4, jotka määräytyvät seuraamusluokista, käytetyistä materiaaleista kuormituksen tyypistä. Eri luotettavuustasot saavutetaan pääasiassa erilaisilla laadunvarmistustoimenpiteillä standardin 1090-2 mukaan sekä lisäksi kuormakertoimilla. Vaadittava varmuustaso saa-

vutetaan pääasiassa laadunvarmistuksen laajuudella, joka määräytyy toteutusluokan mukaan. Lisäksi kuormille käytetään hieman erilaisia kuormakertoimia vaadittua varmuustasoa haettaessa. Materiaalin osavarmuuskertoimet ja lujuudet ovat samat riippumatta seuraamusluokista staattisille kuormituksille. Dynaamisesti kuormitettujen rakenteiden liitoksia ei tässä työssä käsitellä. Mainitaan kuitenkin, että dynaamisille kuormille aineen osavarmuuskertoimet väsymistä vastaan riippuvat rakenteen vaurioitumisen aiheuttamista vahingoista.

Liitoksia suunniteltaessa tarvittavat osavarmuusluvut löytyvät lähteestä [3], taulukko 2.1. Taulukossa esitetyille arvoille on mahdollista antaa kansallisessa liitteessä eri arvot joka tulee huomioida suunnittelussa.

2.3 Kiinnikkeet

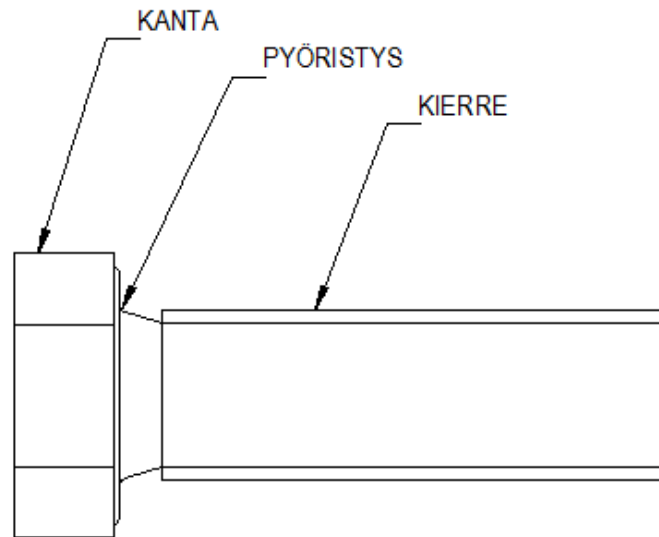
Käytännössä teräsrakenteiden liitoksissa käytettävät kiinnikkeet ovat ruuveja, muttereita ja aluslevyjä. Nämä yhdessä muodostavat ruuvikokoonpanon. Myös erilaisten niittien käyttö on sallittua, mutta erittäin harvinaista käytännön sovellutuksissa.

Ruuvien, muttereiden ja aluslevyjen vaaditut ominaisuudet vaihtelevat liitoksen oletetun toimintatavan mukaan. Kiinnitysluokan A ja D liitoksille käytetään esijännittämättömiä ruuveja ja ruuvikokoonpanojen tulee täyttää standardin SFS-EN 15048 vaatimukset. Tämän standardin vaatimuksia käsitellään myöhemmin.

Kiinnitysluokan B, C, ja E liitoksille, eli esijännitetyille liitoksille, noudatetaan SFS-EN 14399- sarjan standardeja. Niissä esitellään kolme eri ruuvikiinnitystapaa HV, HR ja HRC. Näitäkin käsitellään myöhemmin.

2.3.1 Ruuvit, esijännittämättömät ruuvikokoonpanot

Kantavien rakenteiden kokoamiseen käytettäviä ruuveja on saatavilla useita eri lujuusluokkia. Taulukossa 1 esitetään käytössä olevat lujuusluokat ja niiden myötö- ja murto-
lujuudet.



Kuva 1. Täyskierteinen ruuvi

Ruuvien (pulttien) kierreteet valmistetaan aihioon joko lastuamalla tai muovaamalla. Ruuvien kannan ja varren liittymäkohdassa on pyöristys joka vähentää paikallisia jännityksiä. Kuvassa 1 on esitetty tavanomainen täyskierteinen ruuvi.

Taulukko 1. Teräsrakenteissa käytettävien ruuvien lujuusluokat ja materiaaliominaisuudet [3]:

Ruuvien lujuusluokka	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Suomen kansallinen liite standardissa SFS-EN 1993-1-8 suosittelee käyttämään taulukossa lihavoituja lujuuksia. Lihavoitujen lujuusluokkien käyttö on perusteltua myös kiinnikkeiden saatavuudella, 8.8 ja 10.9 ovat kohtuullisen hyvin saatavissa olevia lujuusluokkia.

Leikkausliitoksissa on suuri merkitys onko pultin kierreellinen osa leikkautuvassa tasossa vai ei. Ehjän ruuvien varren ja kierreellisen osan pinta-alassa on suuri ero jolloin leikkauskestävyys muuttuu pinta-alan mukaan. Taulukossa 2 on esitetty yleisimpien ruuvikokojen ehjän varren ja kierreellisen osan pinta-alat.

Taulukko 2. Yleisimmät ruuvikoot, niiden varren jännityspinta-ala ja ehjän varren pinta-ala.

Kierre	M12	M16	M20	M24	M30	M36
Jännityspinta-ala, mm ²	84,3	157	245	353	561	817
Kierteettömän varren pinta-ala, mm ²	113	201	314	452	706	1017

Käytännössä teräsrakenteissa käytetään aina joko lujuusluokan 8.8 tai 10.9 luokan ruuveja, Suomessa yleisin käytetty luokka on 8.8. Molempien lujuusluokkien ruuvien käytölle on omat perusteensa: 8.8 on sitkeämpää materiaalia, myötölujuus on 80% murtolujuudesta jolloin ruuvilla on enemmän muodonmuutoskykyä. 10.9 luokan ruuvi on hauraampi, myötölujuus on 90% murtolujuudesta. Kuumasinkityissä kiinnikkeissä 10.9 lujuusluokan ruuveissa vetyhaurastumisen riski on todellinen, käytännön suunnittelutyössä asiakas saattaa jopa kieltää 10.9 kiinnikkeiden käytön poistaakseen rakenteellisia riskejä. Kuitenkin liitoksia suunniteltaessa pyritään saamaan levyn reunapuristusmurto määrääväksi verrattuna ruuvin leikkausmurtoon, jolloin lujemmalla ruuvilla voidaan käyttää suurempia ainevahvuuksia liitoslevyissä.

Kaksi yleisintä ruuvityyppiä joita käytetään esijännittämättömissä teräsrakenteiden liitoksissa, ovat kuusioruuveja, joko täys- tai osakierteisiä. Täyskierteisen ruuvin mitat määräytyvät standardin SFS-EN ISO 4017, tarkkuusluokat A ja B (vastaava ruuvi SFS-EN ISO 4018 tarkkuusluokalle C), mukaan ja osakierteisen ruuvin mitat SFS-EN ISO 4014, tarkkuusluokat A ja B (vastaava ruuvi SFS-EN ISO 4016 tarkkuusluokalle C), mukaan. Molempien ruuvityyppien lujuusominaisuudet määräytyvät EN ISO 898-1 mukaan. Taulukossa 3 on koottu yleisimmät esijännittämättömien ruuvien viitestandardit ja niiden määrittämät ominaisuudet.

Taulukko 3. Esijännittämättömien ruuvikokoonpanojen ruuvien viitestandardit.

STANDARDI	SISÄLTÖ	TÄRKEIMMÄT ASIAT
SFS-EN ISO 4014	Osakierteiset kuusioruuvit. Tarkkuusluokat A ja B.	- Lujuusluokat 5.6, 8.8, 10.9 - Koko \leq M24 ja pituus enintään 10*d tai 150mm -> tarkkuusluokka A - Koko > M24 tai pituus > 10*d tai 150mm -> tarkkuusluokka B - Kannan korkeus $\approx 0,63*d$, vaihtelee hieman pultin koon mukaan
SFS-EN ISO 4016	Osakierteiset kuusioruuvit. Tarkkuusluokka C.	- Lujuusluokat 4.6, 4.8 - Kaikki pituudet -> tarkkuusluokka C - Kannan korkeus $\approx 0,63*d$, vaihtelee hieman pultin koon mukaan
SFS-EN ISO 4017	Täyskierteiset kuusioruuvit. Tarkkuusluokat A ja B	- Lujuusluokat 5.6, 8.8, 10.9 - Koko \leq M24 ja pituus enintään 10*d tai 150mm -> tarkkuusluokka A - Koko > M24 tai pituus > 10*d tai 150mm -> tarkkuusluokka B - Kannan korkeus $\approx 0,63*d$, vaihtelee hieman pultin koon mukaan
SFS-EN ISO 4018	Täyskierteiset kuusioruuvit Tarkkuusluokka C	- Lujuusluokat 4.6, 4.8 - Kaikki pituudet -> tarkkuusluokka C - Kannan korkeus $\approx 0,63*d$, vaihtelee hieman pultin koon mukaan
Tarkkuusluokka A = hieno Tarkkuusluokka B = keskihieno Tarkkuusluokka C = karkea		

2.3.2 Mutterit, esijännittämättömät kokoonpanot

Mutterien mitat valitaan standardien EN ISO 4032, EN ISO 4033 ja EN ISO 4034 mukaan. Yleisimmin käytetään EN ISO 4032 mukaisia muttereita. Kuumasinkityissä ruuvikokoonpanoissa näillä muttereilla ei välttämättä saavuteta täyttä ruuvin vetolujuutta, eli kierre kuoriutuu pois ennen kuin ruuvin varsi antaa periksi. Tämä johtuu kuumasinkittyjen kiinnikkeiden toleransseista, koska kuumasinkitys aiheuttaa melko paksun kerroksen ruuvin pintaan (aina vähintään 40 μ m). Tällöin ruuvin varsi joudutaan tekemään hieman alimittaiseksi tai mutterin kierre ylimittaiseksi. Vedetyissä ruuviliitoksissa kannattaakin käyttää standardin EN ISO 4033 mukaisia korkeita muttereita. Vaihtoehtoinen tapa on käyttää yhtä lujuusluokkaa lujempaa mutteria kuin käytetty ruuvi on. Rakennesuunnittelija ei yleensä määrää minkälaisilla toleransseilla ruuvit tilataan jos ne ovat kuumasinkittyjä. Tällöin on erityisen tärkeää että ruuvi ja mutteri tulevat samalta valmistajalta joka vastaa että tuote täyttää EN 15048-1 vaatimukset (mm. täysi vetolujuus saavutettava).

Muttereiden lujuusluokat ovat 4, 5, 6, 8, 10 ja 12. Käytännössä käytetään aina vastaavaa lujuusluokkaa mutteriin kuin mitä pultissa on käytetty. Eli jos käytetään 8.8 luokan ruuvia, mutteriksi valitaan lujuusluokan 8 mutteri.

Taulukko 4. Teräsrakenteissa käytettävät mutterien viitestandardit ja niiden sisältö.

STANDARDI	SISÄLTÖ	TÄRKEIMMÄT ASIAT
EN ISO 4032	Normaalikorkuiset kuusio-mutterit. Tarkkuusluokat A ja B	- Lujuusluokat 5.6, 8.8, 10.9 - Koko $\leq M16 \rightarrow$ tarkkuusluokka A - Koko $> M16 \rightarrow$ tarkkuusluokka B - Korkeus $\approx 0,87*d$, vaihtelee hieman kierteen koon mukaan
EN ISO 4033	korkeat kuusiomutterit. Tarkkuusluokka C.	- Lujuusluokat 9, 12 - Koko $\leq M16 \rightarrow$ tarkkuusluokka A - Koko $> M16 \rightarrow$ tarkkuusluokka B - Korkeus $\approx 0,97*d$, vaihtelee hieman pultin koon mukaan
EN ISO 4034	Normaalikorkuiset kuusio-mutterit. Tarkkuusluokka C.	- Lujuusluokka 5, koko $\leq M16$ - Lujuusluokka 5, $M16 < d \leq M39$ - Kaikki koot \rightarrow Tarkkuusluokka C - Korkeus $\approx 0,87*d$, vaihtelee hieman pultin koon mukaan
Tarkkuusluokka A = hieno Tarkkuusluokka B = keskihieno Tarkkuusluokka C = karkea		

2.3.3 Aluslevyt, esijännittämättömät kokoonpanot

Aluslevyjä käytetään kun halutaan tuoda osakierteisen ruuvien kierteen osa liitettävien levyjen ulkopuolelle. Lisäksi yksileikkeisissä luokan 8.8 ja 10.9 ruuveja käytettäessä täytyy aluslevyjä käyttää sekä ruuvien kannan että mutterin alla. Joskus aluslevyjä käytetään sen osan alla jota kierretään kiristettäessä. Tällä pyritään estämään liitettävien osien pinnoitteen vaurioituminen liitosta kiristettäessä. Taulukossa 5 esitetään käytettävien aluslevyjen viitestandardit ja niiden sisältämät tärkeimmät asiat. Aluslevyissä on tärkeää huomioida aluslevyiltä vaadittava kovuus, joka vaihtelee ruuvikokoonpanon lujuusluokan ja liitostyyppin mukaan. Vaadittavista aluslevyjen kovuuksista on kerrottu lisää kohdassa 2.3.4.

Taulukko 5. Teräsrakenteissa käytettävien aluslevyjen viitestandardit ja niiden sisältö.

STANDARDI	SISÄLTÖ	TÄRKEIMMÄT ASIAT
EN ISO 7089	Pyöreät aluslaatat. Normaalikoko. Tarkkuusluokka A.	- Kovuus HV200 lujuusluokkiin 8.8/8 asti - Kovuus HV300 lujuusluokkiin 10.9/10 asti - Korkeus $\approx 0,15 \cdot d$
EN ISO 7090	Pyöreät viistetyt aluslaatat. Normaalikoko. Tarkkuusluokka A.	- Kovuus HV 200 lujuusluokkiin 8.8/8 asti - Kovuus HV 300 lujuusluokkiin 10.9/10 asti - Korkeus $\approx 0,15 \cdot d$
EN ISO 7091	Pyöreät aluslaatat. Normaalikoko. Tarkkuusluokka C.	- Kovuus HV 100 - Lujuusluokkiin 6.8/6 asti - Korkeus $\approx 0,15 \cdot d$
Tarkkuusluokka A = hieno Tarkkuusluokka B = keskihieno Tarkkuusluokka C = karkea		

Aluslevyjä valittaessa tulee huomioida, että kaikkien toleranssiluokkien levyjä ei voi käyttää kaikkien ruuvien ja muttereiden toleranssiluokkien kanssa ristiin.

2.3.4 Esijännittämättömät ruuvikokoonpanot

Standardi SFS-EN 15048-1 määrittelee yleiset vaatimukset ruuvikokoonpanoille. Kantaa otetaan mm. ruuvien lujuusluokkiin, tarkkuusluokkiin, materiaaliominaisuuksiin ja koko ruuvikokoonpanon ominaisuuksiin. Kaikkien kantavissa rakenteissa käytettävien ruuvikokoonpanojen tulee täyttää tämän standardin vaatimukset, jolloin voidaan olla varmoja että käytettävät kiinnikkeet täyttävät rakenteiden suunnittelussa oletetut lujuusominaisuudet ja että ruuvit ja mutterit ovat keskenään yhteensopivia. Taulukossa 6 esitetään esijännittämättömien ruuvien lujuusluokat ja niiden kanssa yhteensopivat mutterien lujuusluokat ja aluslevyt.

Taulukko 6. Esijännittämättömien ruuvikokoonpanojen sallitut ruuvien lujuusluokat, niihin soveltuvat mutterit ja aluslevyt [4]:

RUUVIT	MUTTERIT	ALUSLEVYT
LUJUUSLUOKKA	LUJUUSLUOKKA	KOVUUS
4.6	4, 5, 6, 8	100 HV min.
4.8		
5.6	5, 6, 8	
5.8		
6.8	6, 8	
8.8	8, 10	100HV min. TAI 300HV-370HV*
10.9	10, 12	
* 8.8 ja 10.9 ruuvien kanssa yksileikkeisessä päällekkäisliitoksessa on käytettävä karkaistuja aluslevyjä sekä ruuvin kannan että mutterin alla. SFS-EN 1993-1-8, kohdat 3.6.1(10) ja 3.6.1(11)		
HUOM! Kuumasinkityissä ruuvikokoonpanoissa ruuvien täyden vetokapasiteetin saavuttamiseksi voi joutua käyttämään yhtä lujuusluokkaa lujempia muttereita tai standardin EN ISO 4033 mukaisia korkeita muttereita. EN 15048-1:2007 taulukko 7 ja EN ISO 10684:2004 liite F.		

Ruuveja, muttereita ja aluslevyjä voidaan valmistaa kolmessa eri tarkkuusluokassa, A, B ja C. Eri tarkkuusluokkien mukaan valmistettuja osia ei saa vapaasti sekoittaa keskenään. Taulukossa 7 on esitetty tarkkuusluokat, joita voi sekoittaa keskenään yhdessä ruuvikokoonpanossa.

Taulukko 7. Keskenään yhteensopivat tarkkuusluokat:

	RUUVIT	MUTTERIT	ALUSLEVYT
YHTEENSOPIVAT TARKKUUSLUOKAT	A, B	A, B, C	A, C
YHTEENSOPIVAT TARKKUUSLUOKAT	C	A, B, C	C

2.3.5 Esijännitettyjen ruuvikokoonpanojen kiinnikkeet

Esijännitettäviä ruuvikokoonpanoja käytetään yleensä jos halutaan liukumisen kestävä liitos, tai jos liitos on väsytyskuormitettu. Käytännössä esijännitettyssä ruuviliitoksessa liitos kiristetään niin tiukalle, että ruuvien varteen tulee esijännitys joka on n. 70% ruuvien myötölujuudesta. Oikein asennettuna esijännitetty ruuviliitos murtuu sitkeästi vetovoiman lisääntyessä ruuvien varressa.

Eurokoodin viitestandardit tuntevat kolme erilaista esijännitettävää ruuvikokoonpanotyyppiä; HR, HV ja HRC. Näiden kolmen eri ruuvikokoonpanon käytettävät tuotteet ja esijännitettyjen ruuvikokoonpanojen yleiset vaatimukset on määritetty 14399- standardisarjassa.

HR-systeemin kiinnikkeinä käytetään standardin 14399-3 mukaisia ruuveja ja muttereita (mutterit ovat EN 4032 mukaisia, mutta 14399-3 antaa lisävaatimuksia kovuudelle). Aluslevyinä käytetään 14399-5 tai 14399-6 mukaisia aluslevyjä. Tämän ruuvikokoonpanon sitkeys vetojännityksen alaisena saavutetaan ruuvin varren venymisellä.

HV- systeemin kiinnikkeet (ruuvit ja mutterit) ovat 14399-4 standardissa määritettyjä. Systeemin mukaisella kokoonpanolla sitkeys saadaan aikaan pääasiassa kierteiden plastisella muodonmuutoksella.

HRC- systeemin ruuvikokoonpanot määritetään 14399-10 standardissa. Liitoksen sitkeys vetovoimalle saadaan ruuvin plastisella venymällä. Ruuvin erikoisuutena on varren päässä oleva uritettu osa, josta ruuvi kiristetään. Kun uritettu osa leikkautuu poikki, on ruuvin esijännitys saavutettu. Taulukossa 8 on esitetty esijännitettujen ruuvikokoonpanojen viitestandardit sekä niiden ydinsisältö.

Taulukko 8. *Esijännitettujen ruuvikokoonpanojen viitestandardit ja ydinsisältö.*

STANDARDI	SISÄLTÖ	TÄRKEIMMÄT ASIAT
EN 14399-1	Yleiset vaatimukset esijännitetyille ruuviliitoksille	<ul style="list-style-type: none"> - Määrittää käytettävät standardit - Ruuvien lujuusluokat 8.8 tai 10.9 - Muttereiden lujuusluokat 8 tai 10 - Liitoskomponentit olatava samalta valmistajalta
EN 14399-2	Testaus	- Testauksen sisältö ja raportti
EN 14399-3	HR-systeemin esijännitetyt ruuvikokoonpanot	<ul style="list-style-type: none"> - Lujuusluokat 8.8/8 tai 10.9/10 - Mutterin korkeus EN 4032 mukaan, n. 0,87*d (HUOM! muut vaatimukset EN 14399-3 mukaan) - Aluslevyt EN 14399-5 tai EN 14399-6 (jälkimmäinen vain mutterin alla) - Ruuvit tarkkuusluokka C - Mutterit tarkkuusluokka B - Ruuvien iskusitkeys 27J / -20°C - Koot M12-M36 - Sitkeys saavutetaan ruuvin plastisella venymisellä

EN 14399-4	HV- systeemin esijännitetyt ruuvikokoonpanot	<ul style="list-style-type: none"> - Lujuusluokka 10.9/10 - Mutterin korkeus n. 0,8*d - Aluslevyt EN 14399-5 tai EN 14399-6 (jälkimmäinen vain mutterin alla) - Ruuvit tarkkuusluokka C - Mutterit tarkkuusluokka B - Ruuvien iskutkeys 27J / -20°C - Koot M12-M36 - Sitkeä toiminta saavutetaan kierteen plastisella muokkautumisella
EN 14399-5	Pyöreät aluslaatat	<ul style="list-style-type: none"> - Kovuus HV 300 - HV 360 - Tarkkuusluokka A - Vain mutterin alle
EN 14399-6	Pyöreät, viistetyt aluslaatat	<ul style="list-style-type: none"> - Kovuus HV 300 - HV 360 - Tarkkuusluokka A - Mutterin tai pultin kannan alle (viistetty puoli pultin kantaa vasten)
EN 14399-7	Uppokantaruuvien HR-järjestelmä	<ul style="list-style-type: none"> - Lujuusluokat 8.8/8 ja 10.9/10 - Mutterin korkeus EN 4032 mukaan - Pultin tarkkuusluokka C - Mutterien tarkkuusluokka B - Aluslevyt EN 14399-5 tai 14399-6 mukaiset - Sitkeä toiminta saavutetaan pultin varren venymisellä
EN 14399-8	Kuusiokantaisten sovite-ruuvien HV-järjestelmä	<ul style="list-style-type: none"> - Lujuusluokka 10.9/10 - Mutterin korkeus n. 0,8*d - Aluslevyt EN 14399-5 tai EN 14399-6 mukaan (jälkimmäinen vain mutterin alla) - Ruuvien varren halkaisija d+1mm - Koot M12 - M36 - Ruuvien iskutkeys 27J / -20°C - Ruuvien tarkkuusluokka C - Mutterin tarkkuusluokka B
EN 14399-9	Jännityksen ilmaisevat aluslaatat HR- ja HV-systeemin ruuvikokoonpanoihin	<ul style="list-style-type: none"> - Käytetään HR- ja HV- systeemin ruuvikokoonpanojen kanssa. Kaikki osat kokoonpanossa tultava samalta valmistajalta - Aluslaatan nystyrät puristuvat kasaan kiristettäessä liitosta - Jännityksen ilmaisevan laatan nystyrät erikois-alulevyä vasten, kovuus HV 370 - HV 338 (EN 14399-9)

EN 14399-10	HRC-systeemin esijännitetyt ruuvikokoonpanot	<ul style="list-style-type: none"> - Lujuusluokka 10.9 / 10 - Koko M12 - M30 - Ruuvin varren päässä uritettu osa, joka katkeaa kun kiristys on riittävä - Ruuvin iskutkeys 27J / -20°C - Ruuvin tarkkuusluokka C - Mutteri sama kuin 14399-3 tai korkeus = 1*d, jälkimmäisen muut vaatimukset standardista 14399-10
-------------	--	---

Taulukossa esitettävien asioiden määrästä voidaan todeta, että esijännitetyille ruuvikokoonpanoille on olemassa hyvin paljon standardeja. Tämä johtuu pääosin useasta eri kiinnikejärjestelmästä jotka ovat kaikki esijännitetyjä ruuvikokoonpanoja. Esijännitettäviä kiinnikeitä suunniteltaessa tulee koko ajan pitää mielessä mikä järjestelmä on valittu ja noudattaa sitten valitun järjestelmän vaatimuksia suunnittelussa ja toteutuksessa. Kiinnikkeitä hankittaessa tulee koko kiinnikejärjestelmä olla samalta valmistajalta, jolloin voidaan olla varmoja että osat ovat toisiinsa yhteensopivia.

3. LIITOSTYYPPIEN LUOKITTELU EUROKOODIN MUKAAN

EC3 luokittelee liitoksia niiden toimintatavan, lujuuden ja jäykkyyden mukaan. Kaikille liitoksille vaaditaan niiden luokittelutavasta riippumatta riittävää muodonmuutoskykyä, jolloin liitoksen murtumistapa pitää olla sitkeä. Tällä voidaan varmistua siitä että liitos ei murru yllättäen vaan muodonmuutokset liitoksessa täytyvät olla melko suuret ennen kuin murtuminen tapahtuu.

3.1.1 Liitosten luokittelu toimintatavan mukaan

Eurokoodissa liitokset luokitellaan toimintatavan mukaan viiteen eri ryhmään:

- Kiinnitysluokka A, **leikkausvoimille**, reunapuristustyyppinen liitos
 - o Liitoksessa voimat siirtyvät kiinnityslevyn ja ruuvien puristuksessa toisiaan vastaan.
 - o Sallitut lujuusluokat ruuveille 4.6...10.9.
 - o Ruuveja ei tarvitse esijännittää.

- Kiinnitysluokka B, **leikkausvoimille**, Käyttörajaatilassa liukumisen kestävä kiinnitys
 - o Voimat siirtyvät käyttörajaatilassa kiinnityspintojen kitkan välityksellä
 - o Murtorajatilassa toimii kuten kiinnitysluokan A liitos
 - o Ruuvien sallitut lujuusluokat 8.8...10.9, esijännitettäväksi tarkoitetut
 - o Ruuvit esijännitetään

- Kiinnitysluokka C, **leikkausvoimille**, Murtorajatilassa liukumisen kestävä kiinnitys
 - o Voimat siirtyvät sekä käyttö- että murtorajatilassa kiinnityspintojen kitkan välityksellä
 - o Murtorajatilassa tarkistettava kuitenkin leikkausrasituksen kestävyys levyn reunapuristukselle, pultin leikkaukselle ja netto-poikkileikkauksen kestävyys vetorasitukselle
 - o Ruuvien sallitut lujuusluokat 8.8...10.9, esijännitettäväksi tarkoitetut

- Kiinnitysluokka D, **vetovoimille**, Kiinnitykset joissa käytetään esijännittämättömiä ruuveja,
 - o Ruuvien varteen kohdistuu vetoa
 - o Käytetään lujuusluokan 4.6...10.9 ruuveja
 - o Ruuveja ei tarvitse esijännittää
 - o Ei käytetä jos kiinnitykseen kohdistuu usein vaihteleva veto-voima, poislukien tuulikuormista aiheutuvat jännitysvaihtelut
- Kiinnitysluokka E, **vetovoimille**, Kiinnitykset joissa käytetään esijännitettäviä ruuveja
 - o Käytetään 8.8...10.9 ruuveja, esijännitettäväksi tarkoitettuja
 - o Soveltuu kiinnityksiin joihin kohdistuu usein vaihteleva veto-voima, esim. nosturiratapalkkien kiinnitykset

3.1.2 Liitosten luokittelu lujuuden mukaan

Eurokoodi luokittelee liitokset lujuuden mukaan kolmeen eri ryhmään:

- Nimellisesti nivelelliset liitokset
 - o Siirtää sisäiset voimat ilman että syntyy merkittäviä momentteja
 - o Täytyy pystyä kiertymään mitoituskuormia vastaavan arvon verran
 - o Liitos voidaan ajatella niveleksi, jos lujuus on korkeintaan 0,25 kertaa täysin lujan liitoksen taivutuskestävyys. Riittävä kiertymiskyky täytyy kuitenkin olla
- Täysin lujat liitokset
 - o Taivutuskestävyyden oltava vähintään liittyvän sauvan taivutuskestävyyden suuruinen
 - o Palkin liittyessä pilarin päähän, taivutuskestävyys vähintään heikomman sauvan suuruinen
 - o Palkin liittyessä pilarin päiden välille, taivutuskestävyys vähintään 2*pilarin taivutuskestävyys tai 1*palkin taivutuskestävyys
- Osittain lujat liitokset
 - o Jos liitos ei kuulu kumpaankaan edellä mainituista liitostyypeistä, luokitellaan liitos osittain lujaksi

3.1.3 Liitosten luokittelu jäykkyyden mukaan

Eurokoodi luokittelee liitokset jäykkyyden mukaan kolmeen eri ryhmään:

- Nimellisesti nivelelliset liitokset
 - o Siirtää sisäiset voimat ilman että syntyy merkittäviä momentteja
- Jäykät liitokset
 - o Riittävä kiertymäjäykkyys, jolloin rakenne voidaan mallintaa jatkuvana
- Osittain jäykät liitokset
 - o Jos liitos ei kuulu kumpaankaan edellisistä ryhmistä, se on osittain jäykkä

4. RAKENTEIDEN ANALYYSI

4.1 Koko rakenteen analysointi eri liitostyypeillä

Teräsrakenteisen kehän tai monimuotoisemman rakenteen voimasuureet ja siirtymät lasketaan nykyään useimmiten laskentaohjelmistoilla joihin voidaan syöttää koko rungon geometria, profiilit ja kuormitukset yhdistelmiseen. Tällaisia ohjelmistoja ovat esim. Staad Pro, Robot, RFEM ja SCIA. helpoin tapa rakentaa laskentamalli on mallintaa sauvat painopistelinjojen suhteen ja jättää epäkeskisyydet huomiotta palkkien liittyessä pilareihin. Lisäksi liitokset mallinnetaan nivelliitoksina tai jäykkinä. Monesti tämä tapa rakentaa laskentamalli on riittävän tarkka. Eurokoodin mukaan ”Liitosten käyttäytymisen vaikutukset rakenteen sisäisten voimien ja momenttien jakaantumiseen ja rakenteen kokonaismuodonmuutoksiin voidaan yleensä jättää huomioon ottamatta. Mikäli nämä vaikutukset ovat merkittäviä (kuten osittain jäykät liitokset), ne otetaan huomioon, ks. EN 1993-1-8” 1993-1-1 s.29”. Siitä, mikä liitos on osittain jäykkä, on Eurokoodissa annettu alkukiertymäjäykkyysrajat, joiden arvot riippuvat liitettävän palkin pituudesta ja neliömomentista. Tämä luokittelu on tarpeellinen tutkittaessa rakennemallia lineaarisen kimmoteorian mukaan. Jos rakennemallia tutkitaan plastisuusteorian mukaan, luokitellaan liitokset lujuuden perusteella.

Rakenteen siirtymätilan vaikutukset tulee ottaa huomioon käyttämällä toisen kertaluvun laskentaa (lasketaan rakennemalli vähintään kahteen kertaan läpi, ensimmäisellä iteraatiokierroksella lasketaan kuormitusten aiheuttamat siirtymät rakenteeseen, toisella iteraatiokierroksella lasketaan sisäiset voimat ja momentit kun kuormitukset vaikuttavat siirtyneeseen rakenteeseen). Toisen kertaluvun vaikutuksia ei tarvitse ottaa huomioon mikäli siirtymien aiheuttamat voimasuureiden ja momenttien kasvu voidaan jättää huomiotta. Raja-arvot sille, että voidaanko toisen kertaluvun vaikutukset jättää huomiotta, voidaan laskea kimmoteorian mukaisessa analyysissä kaavan (1) mukaan ja plastisuusteorian mukaisessa analyysissä kaavan (2) mukaan.

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad (1)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \quad (2)$$

α_{cr} = tekijä, jolla mitoituskuorma kerrotaan, jotta saavutetaan kimmoteorian mukainen kokonaisstabiiliuden menetys

F_{cr} = rakenteen kimmoiseen alkujäykkyyteen perustuva kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma, joka vastaa rakenteen kokonaisstabiiliuden merkitystä

F_{Ed} = rakenteen mitoituskuorma

Käytännössä laskentaohjelmistoa käytettäessä otetaan aina toisen kertaluvun laskenta analyysissä huomioon. Tämä ei lisää suunnittelijan työtä juuri ollenkaan.

Rakennemallin kokonaistarkastelussa voidaan käyttää kolmea eri menetelmää; kimmo-teoriaa, jäykkä-plastista mallia tai kimmo-plastista mallia. Näistä kimmoteoriaan perustuva malli on yleisin, plastisia rakennemalleja ei juurikaan käytetä tavanomaisessa rakentamisessa.

Kimmoteorian mukaista kokonaistarkastelua voidaan käyttää aina riippumatta rakenteen sauvojen poikkileikkausluokasta ja yksittäisten sauvojen mitoistavasta (kimmoteorialla tai plastisuusteorialla). Siinä lasketaan rakenteen siirtymät ja voimasuureet olettaen jännitys-venymä käyttäytymisen olevan sama jännitystasosta riippumatta. Tällöin suunnittelijan tulee huolehtia että rakennemallissa on oikeat profiilit myös, jos yksittäisten sauvojen mitoitus tehdään eri ohjelmalla saatujen voimasuureiden mukaan. Yksittäiset sauvat voidaan mitoittaa joko kimmoteorian tai plastisuusteorian mukaan, reunaehtona sauvan poikkileikkausluokka. Myös liitokset voidaan mitoittaa joko kimmoteorialla tai plastisuusteorialla. Kimmoteoriaa käytettäessä tulee liitosten jäykkyys ottaa huomioon, mikäli liitoksen jäykkyys on riittävän suuri.

Jäykkä-plastista kokonaistarkastelua voidaan käyttää mikäli rakenteen siirtymiä ei tarvitse huomioida. Siinä ajatellaan rakenteen olevan täysin jäykkä kunnes johonkin kohtaan rakennetta muodostuu plastinen nivel. Tällöin voivat rakenteen sisäiset momentit jakaantua uudelleen ja rakenne kestää lisää kuormitusta. Liitokset luokitellaan niiden lujuuden mukaan ja liitoksilla tulee olla riittävä kiertymiskyky. On huomattava, että rakenteen kantokyky voidaan kuitenkin katsoa ylittyvän mikäli siirtymät ylittävät raja-arvon. Kaikille plastisuusteorian mukaisille kokonaistarkasteluille annetaan rakenteelle vaatimuksia; sauvoilla ja liitoksilla tulee olla riittävä kiertymiskyky plastisten nivelten kohdalla.

Kimmo-plastisessa analyysissä huomioidaan materiaalin kaksoislineaarinen käyttäytyminen; aluksi jännitykset kasvavat siirtymien suurentuessa, ja jännityksen saavuttaessa teräksen ylemmän myötörajan eivät jännitykset enää kasva vaikka venymät suurenevatin. Tämä ilmiö tapahtuu plastisissa nivelissä.

Kaikista yleisin ja käyttökelpoisin kokonaistarkastelumalli rakenteille on kimmoteorian mukainen kokonaistarkastelu. Sillä saadaan taloudellisia rakenteita suunniteltua ja materiaalisäästöä on mahdollista saavuttaa käytettäessä liitosten kiertymäjäykkyyttä sisäisten voimien ja momenttien laskemiseen.

4.2 Osittain jäykän liitoksen mallintaminen nivelenä rakenne-malliin

Lähteen [6] mukaan osittain jäykät liitokset voidaan mallintaa Eurokoodienkin mukaisessa suunnittelussa nivelellisinä, jolloin koko rakenteen rakennemallin tekeminen ja laskeminen on huomattavan paljon yksinkertaisempaa. Ehdottomana vaatimuksena liitoksille asetetaan silloin että liitoksilla on oltava riittävä kiertymiskyky ja riittävän sitkeä murtumistapa. Tämä tavan käyttäminen on perusteltu seuraavilla argumenteilla:

- Rakenteen sivusiirtymien osalta osittain jäykkien liitosten mallintaminen nivelellisinä tuottaa laskennassa aina varmallalla puolella olevan tuloksen, koska rakenteen todellinen jäykkyys on suurempi kuin nivelellisillä liitoksilla.
- Rakenteen ensimmäisen kertaluvun plastinen murtokuorma on todellisuudessa aina suurempi kuin nivelliitoksisen rakenteen, koska todellisuudessa liitoksilla on jonkin verran momenttikapasiteettia
- Lineaarisen laskentamallin pilareiden stabiliteetin menetys tapahtuu aiemmin kuin todellisella rakenteella koska liitoksilla on todellisuudessa jonkin verran jäykkyyttä. Kuitenkin globaalit ja lokaalit stabiliteettien menetykset täytyy ottaa huomioon.
- Elasto-plastisen rakennemallin jäykkyys on myös suurempi kuin todellisen rakenteen. Tähän on lähteessä [6] lisäviittauksia.

5. LIITOSKOMPONENTIT JA NIIDEN OMINAISUUDET JA MITOITUS

5.1 Ruuvikiinnitykset

Ruuvikiinnityksissä on useita kohtia joiden kestävyys tulee tarkistaa laskelmin. Kiinnitysten tutkiminen sinänsä on kohtuullisen helppoa, koska kiinnityksistä voidaan aina poimia tarkasteltavat kohdat. Näiden yksittäisten kohtien laskelmat eivät useimmiten ole monimutkaisia. Käytännön suunnittelutyössä ei suunnittelija kuitenkaan laske kaikkia kohtia käsin, vaan käyttää jotain kaupallista ohjelmistoa tai valmiiksi laskettuja taulukoita perustapauksille. Seuraavissa kappaleissa esitetään yleisimpien peruskomponenttien mitoitus kyseiselle komponentille tyypilliselle rasitukselle.

5.1.1 Ruuvin leikkautuminen

Ruuvin leikkauskestävyys on ruuviliitoksen peruskomponentti, jonka riittävydestä tulee aina varmistua ruviliitosta suunniteltaessa. Usein liitokset suunnitellaan siten, että voimat välittyvät ruuvin leikkauksen välityksellä. Tällöin pystytään välttämään paksujen levyjen käyttöä, joita väistämättä tulee jos ruuvi välittää voimia ruuvin varren suunnalla jännityksellä.

Ruuvin leikkauskestävyyttä laskettaessa käytettävä ruuvin lujuusluokka (8.8, 10.9. ...) vaikuttaa laskentakaavan kertoimiin. Toinen merkittävästi ruuvin leikkauskestävyyteen vaikuttava seikka on että leikkautuuko ruuvi varren kierteellisestä vai kierteettömästä kohdasta. Laskentakaavat pätevät kun ruuvit ovat taulukon 9 mukaisissa normaaleissa nimellisvälyksen kokoisissa rei'issä.

Tässä tulee huomata että useimmiten teräsrakenteiden liitokset toteutetaan 2 mm mukaisissa välyksissä. Kuitenkin 12 mm (ja 14 mm) ruuveille nimellisvälyys on vain 1 mm. Jos 12 mm (tai 14 mm) ruuveille käytetään 2 mm välyksellä olevaa reikää, tulee ruuvin leikkauskapasiteettia pienentää kertoimella 0,85 lujuusluokan 4.8, 5.8, 6.8, 8.8 ja 10.9 ruuveille. Lisäehtona 2 mm välyksen käytölle 12 mm ja 14 mm ruuveille on, että ruuviryhmän reunapuristuskestävyys on suurempi tai yhtä suuri kuin ruuviryhmän leikkauskestävyys [3]. Käytännössä 12 mm ruuveja ei ole järkevää käyttää kantavien teräsrunkojen liitoksissa, vaan suositeltava minimi koko on 16 mm. Sekundääristen rakenteiden ja ohutlevytuotteiden kiinnittämiseen 12 mm ruuvit ovat järkeviä.

Taulukko 9. Nimellisvälykset ruuveille ja niveltapeille [2].

Ruuvien tai niveltapin nimellishalkaisija (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27 ja yli
Normaalit pyöreät reiät ^a	1 ^{b,c}		2					3
Ylisuuret pyöreät reiät	3		4				6	8
Lyhyet pidennetyt reiät (pituudelle) ^d	4		6				8	10
Pitkät pidennetyt reiät (pituudelle) ^d	1,5 d							
^a Torneille, mastoille ja vastaaville sovellutuksille normaalien pyöreiden reikien nimellisvälystä pienennetään 0,5mm, ellei erikseen toisin esitetä.								
^b Pinnoitetuille kiinnittimille 1mm:n nimellisvälystä voidaan suurentaa pinnoitteen paksuuden verran								
^c Ruuveille, joiden nimeelishalkaisija on 12 tai 14 mm ja uppokantaruuveille voidaan käyttää myös 2 mm:n välystä standardissa EN 1993-1-8 esitettyjä ehtoja noudattaen.								
^d Pidennetyissä rei'issä ruuvien nimellisvälyksen tulee leveyssuunnassa olla sama kuin normaaleilla pyöreillä rei'illä								

Ruuvien varren kierteettömän osan leikkauskestävyys lasketaan kaikkien lujuusluokkien ruuveille kaavan (3) mukaan.

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

$F_{V,Rd}$ = Ruuvien leikkauskestävyyden laskenta-arvo

f_{ub} = ruuvien materiaalin murtolujuus

A = ruuvien varren kierteettömän osan poikkipinta-ala

γ_{M2} = ruuvien kestävyysvarmuuskerroin. Kansallisesti valittava parametri, eurokoodin suositus ja Suomessa käytettävä arvo on 1,25.

Esimerkki:

Lasketaan M16 kokoisen 8.8 lujuusluokan ruuvien varren kierteettömän osan leikkauskestävyys.

$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$

$A = 201 \text{ mm}^2$

$\gamma_{m2} = 1,25$

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \times 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 201 \text{ mm}^2}{1,25} = 77184 \text{ N} \quad (4)$$

Ruuvien varren kierteellisen osan leikkauskestävyys lasketaan lujuusluokkien 4.6, 5.6 ja **8.8** ruuveille kaavalla (5) ja lujuusluokkien 4.8, 5.8, 6.8 ja **10.9** ruuveille kaavalla (6).

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

$$F_{V,Rd} = \frac{0,5 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6)$$

$F_{V,Rd}$ = Ruuvien leikkauskestävyyden laskenta-arvo

f_{ub} = ruuvien materiaalin murtolujuus

A_s = ruuvien varren kierteettömän osan poikkipinta-ala

γ_{M2} = ruuvien kestävyysvarmuuskerroin. Kansallisesti valittava parametri, eurokoodin suositus ja Suomessa käytettävä arvo on 1,25.

Esimerkki:

Lasketaan sama ruuvi kuin edellisessä esimerkissä, mutta nyt kierteellisen osan leikkauskestävyys.

$f_{ub}=800 \text{ MPa}$

$A_s=157 \text{ mm}^2$

$\gamma_{M2} = 1,25$

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \times 800 \frac{N}{mm^2} \times 157 mm^2}{1,25} = 60288 N \quad (7)$$

Tuloksesta nähdään että 8.8 lujuusluokan M16 ruuvilla kierteellisen osan leikkauskestävyys on n.78% kierteettömän osan leikkauskestävyydestä.

Esimerkki:

Lasketaan saman kokoisen ruuvien kierteellisen osan leikkauskestävyys kuin edellä, mutta 10.9 lujuusluokan aineesta tehtynä.

$f_{ub}=1000 \text{ MPa}$

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{V,Rd} = \frac{0,5 \times 1000 \frac{N}{mm^2} \times 157 mm^2}{1,25} = 62800 N \quad (8)$$

Tuloksesta nähdään, että lujuusluokan kasvattaminen 8.8 luokasta 10.9 luokkaan kasvatti kierteellisen osan leikkauskestävyyttä vain 4,2 %.

5.1.2 Ruuvien vetokestävyys

Ruuvien vetokestävyyttä tarvitaan monesti momenttijäykissä liitoksissa ja profiilien jatkosliitoksissa jolloin vetovoimia siirretään ruuvien varren kautta levystä toiseen.

Ruuvien vetokestävyyttä laskettaessa tutkitaan ruuvien varren kierteellisen osan kestävyyttä vetojännitykselle. Kierteellinen osa on tehty viitestandardien mukaisissa ruuveissa heikoimmaksi osaksi ruuvia, joten muita osia, kuten mutterin ja kierteen välistä leikkautumista, kannan ja varren välistä leikkautumista yms. ei tarvitse tutkia.

Edellä mainittuja oletuksia tehtäessä on tärkeää että ruuvikokoonpanot ovat standardin EN 15048-1 ja sen viitestandardien mukaisia. Käytännössä tämä tarkoittaa että ruuvi, mutteri sekä mahdolliset aluslevyt ovat saman valmistajan toimittamia ja testaamia. Ruuvien ja mutterin välisen kierteen leikkautuminen ennen ruuvien varren murtumista on mahdollista jos käytetään muita kuin saman valmistajan toimittamia ruuvikokoonpanoja. Tämä johtuu siitä, että yleisimmin käytetyissä kuumasinkityissä kiinnikkeissä voi valmistaja valita millaista toleranssijärjestelmää käyttää ottamaan huomioon kuumasinkityksen paksuus.

Lyhyesti toleranssit voivat olla siten, että ruuvien kierteellinen osuus tehdään hieman pienemmäksi, jolloin kuumasinkityskerroksen tekemisen jälkeen ruuvi sopii mutteriin hyvin. Toinen vaihtoehto on tehdä ruuvien kierteet ”normaalikokoisiksi” ja tehdä mutterin kierteet hieman ylisuuriksi. Jos ruuveja ja muttereita hankitaan useista paikoista eikä olla toleranssiluokkien kanssa tarkkana, voi alimittaiseksi tehtyyn ruuviin tulla asennetuksi ylimittaiseksi kierteitetty mutteri. Tällöin kierteen leikkautuminen on mahdollista ennen kuin ruuvien kantaa antaa periksi.

Muutenkin ruuvikokoonpanon toimittaja on joutunut testaamaan muttereiden ja ruuvien yhteensopivuuden kuormituskokeilla. Tämä vaatimus on siis nimenomaan Eurokoodin viitestandardien mukaisilla kiinnikkeillä. Käytännössä tulee siis ruuvikokoonpanoja suunniteltaessa vaatia aina CE-merkittyjä kokoonpanoja.

Ruuvien vetokestävyys lasketaan kaavan (9) mukaan.

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} \quad (9)$$

$F_{t,Rd}$ = Ruuvien vetokestävyysmitoitussarvo

$k_2 = 0,63$ uppokantaruuveilla

$k_2 = 0,90$ muille ruuveille

f_{ub} = ruuvien materiaalin murtolujuus

A_s = ruuvien varren kierteettömän osan poikkipinta-ala

γ_{M2} = ruuvien kestävyysvarmuuskerroin. Kansallisesti valittava parametri, eurokoodin suositus ja Suomessa käytettävä arvo on 1,25.

Esimerkki:

Lasketaan M16-kokoisen, 8.8 lujuusluokan ruuvien vetokestävyysmitoitussarvo

$k_2 = 0,90$ (tavallinen EN 4014 mukainen osakierteinen ruuvi)

$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$

$A_s = 157 \text{ mm}^2$

$\gamma_{m2} = 1,25$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 800 \text{ MPa} \times 157 \text{ mm}^2}{1,25} \quad (10)$$

$$F_{t,Rd} = 90432 \text{ N} \approx 90,4 \text{ kN}$$

Kiinnityksissä, joissa ruuvien varren vetojännitykset vaihteleva, käytetään esijännitettä ruuvikiinnityksiä. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi nostinpalkin kiinnitykset tai muut dynaamisia kuormituksia välittävät kiinnitykset. Tuulikuormia siirtävissä kiinnityksissä ei Eurokoodin mukaan tarvitse käyttää esijännitettä ruuvikokoonpanoja. Tä-

mä tarkoittaa että jos tuulikuormat siirretään ruuvin varren leikkauksella, ei tarvitse käyttää kitkaliitosta. Samoin, jos voimat siirretään ruuvin varren suuntaisella jännityksillä, ei tarvitse käyttää esijännitettyjä ruuvikokoonpanoja.

Esijännitys ei pienennä ruuvin vetokestävyyttä, mutta vaikuttaa leikkauskestävyyteen seuraavassa kohdassa esitellyn yhteisvaikutuskaavan mukaan.

5.1.3 Ruuvin yhdistetty leikkaus- ja vetokestävyys

Ruuville tulee aina tarkistaa veto- ja leikkausvoimien yhteisvaikutus kaavan (11) mukaan.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \times F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (11)$$

$F_{v,Ed}$ = Ruuvin leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$F_{v,Rd}$ = Ruuvin leikkauskestävyyden mitoitusarvo

$F_{t,Ed}$ = Ruuvin vetovoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$F_{t,Rd}$ = Ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvo

Esimerkki:

Tarkistetaan M16 ruuvin, 8.8 lujuusluokka, yhdistetty veto- ja leikkauskestävyys. Veto-voima 30kN ja leikkausvoima 40kN. Leikkaustaso sijaitsee ruuvin varren kierteettömällä osalla.

$$F_{v,Ed} = 40 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 77,2 \text{ kN}$$

$$F_{t,Ed} = 30 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = 90,4 \text{ kN}$$

$$\frac{40 \text{ kN}}{77,2 \text{ kN}} + \frac{30 \text{ kN}}{1,4 \times 90,4 \text{ kN}} = 0,76 \quad (12)$$

Käyttöaste on 76 %, joten ruuvi kestää hyvin yhdistetyt rasitukset.

5.1.6 Palamurtuminen

Palamurtumisessa perusaineesta irtoaa pala ruuvien keskilinjoihin pitkin. Murrosta osa perusaineesta murtuu leikkausvoiman johdosta ja osa vetovoiman johdosta. Palamurtuminen pitää tarkistaa kaikille mahdollisille murtoviivoille.

Symmetrisen ruuviryhmän palamurtumiskestävyys keskeiselle kuormalle lasketaan kaavan (14) mukaan.

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u \times A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \times f_y \times A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

A_{nt} = vedon rasittama nettopinta-ala

A_{nv} = leikkauksen rasittama nettopinta-ala

Symmetrisen ruuviryhmän palamurtumiskestävyys epäkeskeiselle kuormalle lasketaan kaavan (15) mukaan.

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 \times \frac{f_u \times A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \times f_y \times A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

5.2 Hitsauskiinnitykset

SFS-EN 1993-1-8 ohjeistaa hitsauskiinnitysten laskentaa vähintään 4mm paksuille rakenneteräksille, tässä luvussa esitetään em. ohjeita. Pienahitsin kestävyyttä voidaan Eurokoodin mukaan tarkastella kahdella eri menetelmällä: komponenttimenetelmällä ja yksinkertaistetulla menetelmällä.

Komponenttimenetelmässä hitsin siirtämät voimat jaetaan hitsin laskentapinnan suuntiin ja sitä vastaan kohtisuorassa oleviin komponentteihin sekä hitsin akselin suuntaan ja sitä vastaan kohtisuorassa oleviin komponentteihin. Hitsin kestävyys tarkastetaan komponenttien yhdistelmällä kaavojen (16) ja (17) mukaan. Taulukossa 10 on esitetty pienahitsien laskennassa tarvittavan korrelaatiokerrointen arvot.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \quad (16)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (17)$$

f_u = heikomman liitettävän osan murtolujuus

β_w = taulukon 10 mukainen korrelaatiokerroin

σ_{\perp} = laskentapintaa vastaan kohtisuoraan oleva jännitys

τ_{\perp} = hitsin akselia vastaan kohtisuora leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa)

τ_{\parallel} = hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa)

Taulukko 10. Pienahitsien korrelaatiokerroimet [3].

Standardi ja teräslaji			Korrelaatiokerroin β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S235 S235W	S235H	S235H	0,8
S275 S275 N/NL S275 M/ML	S275H S275 NH/NLH	S275H S275 NH/NLH S275 MH/MLH	0,85
S355 S355 N/NL S355 M/ML S355W	S355H S355 NH/NLH	S355H S355 NH/NLH S355 MH/MLH	0,9
S420 N/NL S420 M/ML		S420 MH/NLH	1,0
S460 N/NL S460 M/ML S460 Q/QL/QL1	S460 NH/NLH	S460 NH/NLH S460 MH/MLH	1,0

Yksinkertaistetussa menetelmässä hitsin jännitys lasketaan voiman suunnasta riippumatta suoraan hitsin pinta-alalle ja hitsin kestävyys tarkistetaan kaavan (18) mukaan.

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \quad (18)$$

f_u ja β_w osat samoja kuin edellisessä kaavassa.

5.3 Muut liitosten komponentit

Liitoksessa on myös muita komponentteja kuin edellä esitetyt, jotka saattavat olla määräviä liitoksen kestävyudessa. Tällaisia ovat mm. pilarin uuman leikkaus, pilarin uuman poikittainen veto tai puristus, pilarin laipan tai päätylevyn taivutus, palkin tai pilarin laipan ja uuman puristus, palkin uuman veto. Komponentit ja niiden kestävyyslaskenta ja jäykkyystekijät ovat esitetty lähteen [3] taulukossa 6.1.

6. LIITOKSEN KIERTYMISJÄYKKYYS

Aiemmin on jo todettu että liitokset jaotellaan nimellisesti nivelellisiin, osittain jäykkiin ja jäykkiin liitoksiin liitoksen kiertymäjäykkyyden perusteella. Jaottelulla on merkitystä koko rakenteen analyysimallia tehtäessä, jolloin tulee tietää millaiset ominaisuudet liitokselle annetaan malliin. Kuvassa 2 on esitetty eri liitostyyppien siirtämän momentin ja kiertymän suhdetta.

Liitos oletetaan nimellisesti nivelelliseksi rakennemallissa jos kaavan (19) ehto täyttyy:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 \times EI_b/L_b \quad (19)$$

$S_{j,ini}$ = liitoksen alkukiertymäjäykkyys

E = teräksen kimmokerroin

I_b = palkin hitausmomentti

L_b = palkin pituus

Liitoksen jäykkyyden luokitteluun vaikuttaa olennaisesti liitettävän palkin jäykkyys ja pituus. Tällöin kovin jäykän ja lyhyen palkin niveleksi luokiteltavan liitoksen alkukiertymäjäykkyys saa olla moninkertainen verrattuna pitkän ja vähemmän jäykän palkin liitokseen.

Liitos luokitellaan jäyäksi jos kaavan (20) ehto täyttyy:

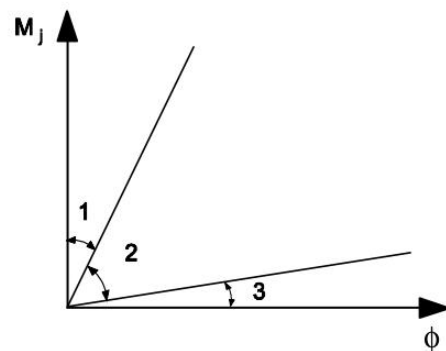
$$S_{j,ini} \geq k_b \times EI_b/L_b \quad (20)$$

$k_b=8$ kehillä, joissa jäykistysjärjestelmä pienentää vaakasuuntaisia siirtymiä vähintään 80%

$k_b=25$ muilla kehillä, olettaen että jokaisessa kerroksessa on voimassa $K_b/K_c \geq 0,1$

K_b = tarkasteltavan kerroksen yläpäässä olevien kaikkien palkkien I_b/L_b -arvojen keskiarvo

K_c = tarkasteltavassa kerroksessa olevien kaikkien pilareiden I_c/L_c -arvojen keskiarvo



Kuva 2. Jäykän (1), osittain jäykän (2) ja nivelellisen liitoksen (3) sisäinen momentti suhteessa kiertymään

Mikäli liitos ei ole jäykkä tai nivel, se luokitellaan osittain jäykäksi. Liitoksen kiertymäjäykkyys lasketaan jousimallilla, jonka jousivakiot lasketaan lähteen [3] mukaan. Samassa lähteessä on perustusliitoksien jäykkyyksille annettu omat raja-arvot.

Alkukiertymäjäykkyyttä voidaan käyttää myös laskentamallissa liitoksen kiertymäjäykkyytenä, mikäli liitoksen momenttikapasiteetista käytetään korkeintaan $2/3$. Mikäli liitoksen momenttikestävyydestä käytetään enemmän kuin $2/3$, voidaan liitoksen kiertymäjäykkyytenä laskentamallissa käyttää lähteen [3] taulukon 5.2 mukaisella kertoimella jaettua alkukiertymäjäykkyyden arvoa. Toinen vaihtoehto on laskea kiertymäjäykkyyden arvo saman lähteen kohdan 6.2 mukaan, jolloin laskentamallissa käytettävän kiertymäjäykkyyden arvo pienenee liitoksen momenttikestävyyden käyttöasteen kasvaessa.

7. LIITOSTEN VALMISTUS JA ASENNUS

Teräsrakenteiden liitosten valmistuksesta ja asennuksesta suunnittelija laatii toteutuseritelmän, jonka mukaan valmistus ja asennus tulee tehdä. Toteutuseritelämä pohjautuu pitkälti standardiin SFS-EN 1090-2, joka määrittelee vaatimukset Eurokoodien mukaan suunniteltujen teräsrakenteiden toteutukselle. Samassa standardissa myös määritellään toteutuksessa käytettävien tuotteiden laatuvaatimukset viitestandardien kautta. Kun suunnittelu tehdään Eurokoodien mukaan ja toteutus SFS-EN 1090-2 mukaan, voidaan varmistua valmiin rakenteen kelvollisuudesta. Muita toteutustapoja ei hyväksytä Eurokoodien mukaan suunnitelluille teräsrakenteille.

Teräsrakenteet jaetaan neljään toteutusluokkaan, EXC1...EXC4 [2]. Laatuvaatimukset ovat pienimmät luokassa EXC1 ja vaativimmat laatuvaatimukset ovat toteutusluokassa EXC4. Suunnittelija valitsee toteutusluokan koko rakenteelle tai yksittäiselle rakenneosalle, suositusmatriisi toteutusluokan valinnalle löytyy lähteestä [2], taulukko B.3. Jos toteutusluokkaa ei ole erikseen valittu, se on EXC2. Tämä luokka on tavanomaisille rakenteille soveltuva luokka.

Teräsrakenteet valmistavan konepajan täytyy toimia valmistuksessa toteutuseritelmän ja SFS-EN 1090-2 vaatimusten mukaan. Toteutusluokan ja suunnittelijan tekemän toteutuseritelmän mukaan määräytyy tuotannon ja asennuksen laatuvaatimuksia [2]:

- käytettäville tuotteille
- esivalmistukselle ja kokoamiselle
- hitsaukselle
- mekaaniselle kiinnittämiselle
- asentamiselle
- pintakäsittelylle
- geometrisille toleransseille
- tarkastukselle, testaukselle ja kokoamiselle

Teräsrakenteiden liitoksiin liittyen erityistä huomiota tulee kohdistaa hitsaukseen, koska konepajalla hitsaamalla toisiinsa liitetyt osat ovat olennainen osa valmista liitosta. Hitsauksen laatuvaatimukset määräytyvät toteutusluokan mukaan standardiin EN ISO 3834 viitaten [2]:

- EXC1: Osa 4 ”Peruslaatuvaatimukset”
- EXC2: Osa 3 ”Vakiolaatuvaatimukset”
- EXC3 ja EXC4: Osa 2 ”Kattavat laatuvaatimukset”

Tavanomaisissa rakenteissa sovelletaan vakiolaatuvaatimuksia. Hitsauksen kustannukset kohoavat selvästi jos sovelletaan kattavia laatuvaatimuksia, joten suunnittelijan tulee harkita tarkkaan milloin näiden laatuvaatimusten soveltaminen on tarpeellista. Suunnittelija voi toteutuseritelmässä myös määrätä erityistä laaduntarkkailua tietyille rakenneosille oman harkintansa ja tilaajan toiveiden mukaan.

Työmaalla liitoksen osista asennetaan useimmiten vain pultit, jolloin liitos on valmis. Ruuvien asennuksessa tulee huomioida erityisesti että koko ruuvikokoonpano tulee samalta valmistajalta ja on CE-merkitty. Aluslevyjen käyttö tulee varmistaa eri liitostyypeille. Lisäksi esijännittämättömät ruuviliitokset tulee kiristää vähintään tiukkaan kiristykseen [2]. Lisäohjeena samassa lähteessä annetaan että ”tiukka kiristys voidaan yleensä katsoa saavutetuksi, kun asentaja käyttää tavallisen kokoista ruuviavainta ilman lisävartta, tai kun iskevä momenttiavain alkaa vasaroida”. Suunnittelija voi tehdä toteutuseritelmään taulukon esijännittämättömien ruuviliitosten kiristämisestä. Esijännitettyjen ruuviliitosten kiristämistä ohjeistetaan lähteen [2] kohdassa 8.5.

Huolellisen valmistuksen, asennuksen ja dokumentoinnin lopputuloksena saadaan laatuvaatimukset täyttävä teräsrakenteiden liitos, jonka voidaan olettaa toimivan suunnitellusti koko käyttöikänsä ajan.

8. LIITOKSEN KIERTYMISJÄYKKYYDEN VAIKUTUS KEHÄRAKENTEeseen

Liitosten kiertymäjäykkyydellä on huomattavan suuri merkitys koko rakenteen eri sauvojen voimasuureisiin, rakenteen kokonaisjäykkyyteen sekä koko rakenteen taloudellisuuteen. Lähteessä [5] on tutkittu liitosten jäykkyyden vaikutusta kehärakenteeseen kun aluksi käytetään täysin jäykkiä liitoksia ja sitten liitosten jäykkyyttä on pienennetty vähän kerrallaan. Samalla on laskettu liitosten valmistuskustannuksien muutosta.

Seuraavaksi esitellään tutkielma kehärakenteen liitosjäykkyyden vaikutuksesta koko rakenteeseen sekä liitosgeometrian että sauvojen voimasuureiden ja profiilien osalta. Laskenta on tehty Robot ohjelmalla sekä liitosten että sauvojen osalta. Aivan aluksi kehärakenne on laskettu nivelliitoksilla ja sauvat on mitoitettu näin saaduilla voimasuureilla. Seuraavaksi sama rakenne on laskettu osittain jäykillä liitoksilla käyttäen samoja profiileja kuin nivelellisessä rakennemallissa. Kun uudet voimasuureet on laskettu osittain jäykillä liitoksilla, on profiileja optimoitu uusien voimasuureiden mukaan. Samalla liitoksia on myös muokattu tarkoituksena hakea optimaalinen ratkaisu koko rakenteelle. Lopuksi on laskettu vertailukehä täysin jäykillä liitoksilla.

Liitoksien kiertymäjäykkyytenä on käytetty osittain jäykillä liitoksilla liitoksen momenttikapasiteetin käyttöasteesta riippuvaa arvoa. Robot-ohjelmassa on liitoksien laskentamallissa käytettävän kiertymisjäykkyyden laskentaan kohtuullisen toimiva ratkaisu:

- Ensin kehärakenne lasketaan läpi täysin jäykillä liitoksilla
- Liitoslaskentapuolella jokaiselle liitoskohdalle määritetään liitos
- Liitoksien käyttöaste, alkukiertymäjäykkyys ja laskentamallissa käytettävä kiertymisjäykkyys lasketaan (käyttöaste tulee tässä vaiheessa liian suureksi ja laskentamallissa käytettävä kiertymisjäykkyys liian pieneksi)
- Valitaan ”Rigidity Analysis” käsky, joka syöttää kehän laskentamalliin kiertymisjäykkyydet, laskee mallin uudestaan ja laskee liitokset uudestaan
- Edellistä kohtaa toistetaan muutaman kerran jolloin kehärakenteen momenteissa ei enää tapahdu muutoksia

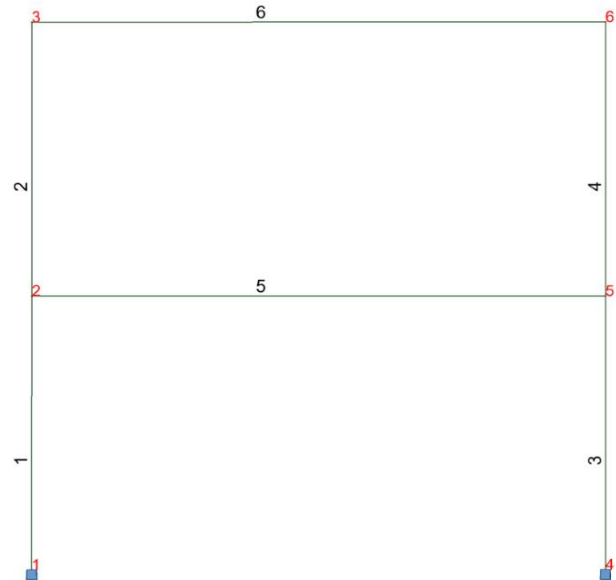
8.1 Kehärakenteen laskenta

Kehärakenteena on sivusiirtyvä kehä, jonka pilariväli on 7,0m, ja kerroskorkeus 3,5m. Kaikkien rakenneterästen materiaalina on S355J2, ruuvien materiaali on 8.8. Ylemmällä palkilla on laskentakuormana tasainen viivakuorma 82,1kN/m, alemmalla palkilla laskentakuormana on 107,3kN/m. Vasemmanpuoleisella pilarilla on vaakakuormana las-

kentakuorma $6,44\text{kN/m}$ ja oikeanpuoleisella pilarilla vaakakuormana laskentakuorma $3,45\text{kN/m}$. Kuormitusyhdistelyä on vain yksi yhdistelmä, jossa on kaikki edellä mainitut kuormat ilman kuormakertoimia.

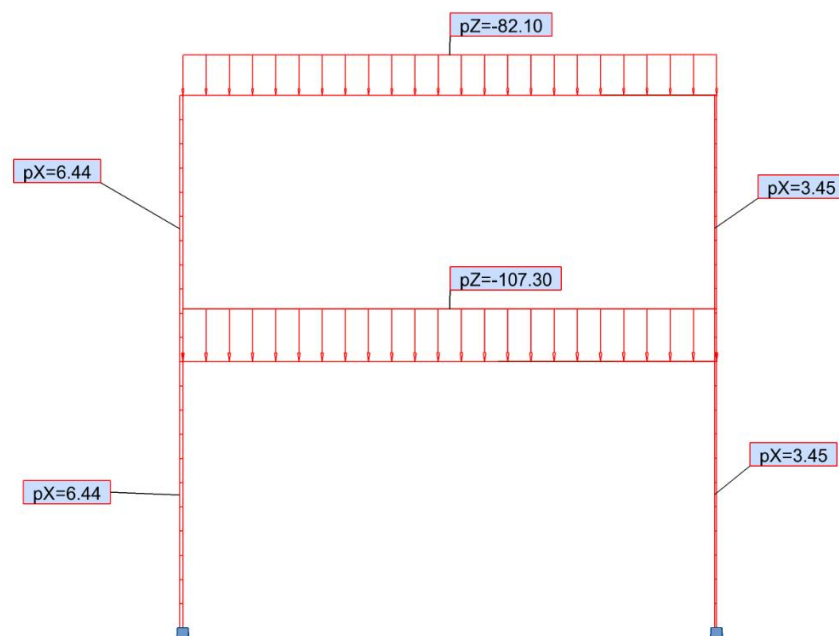
Palkkien mitoituksessa on oletettu että palkit ovat tuettu sivusuunnassa kiepahdukselle ja nurjahdukselle palkin jännevälän keskeltä, jolloin tukiväli nurjahdukselle ja kiepahdukselle on laskennassa $3,5\text{m}$ välein.

Nurjahduspituus palkin vahvempaan suuntaan on palkin pituus.



Kuva 3. Kehän rakennemalli, solmunumerot ja sauvanumerot.

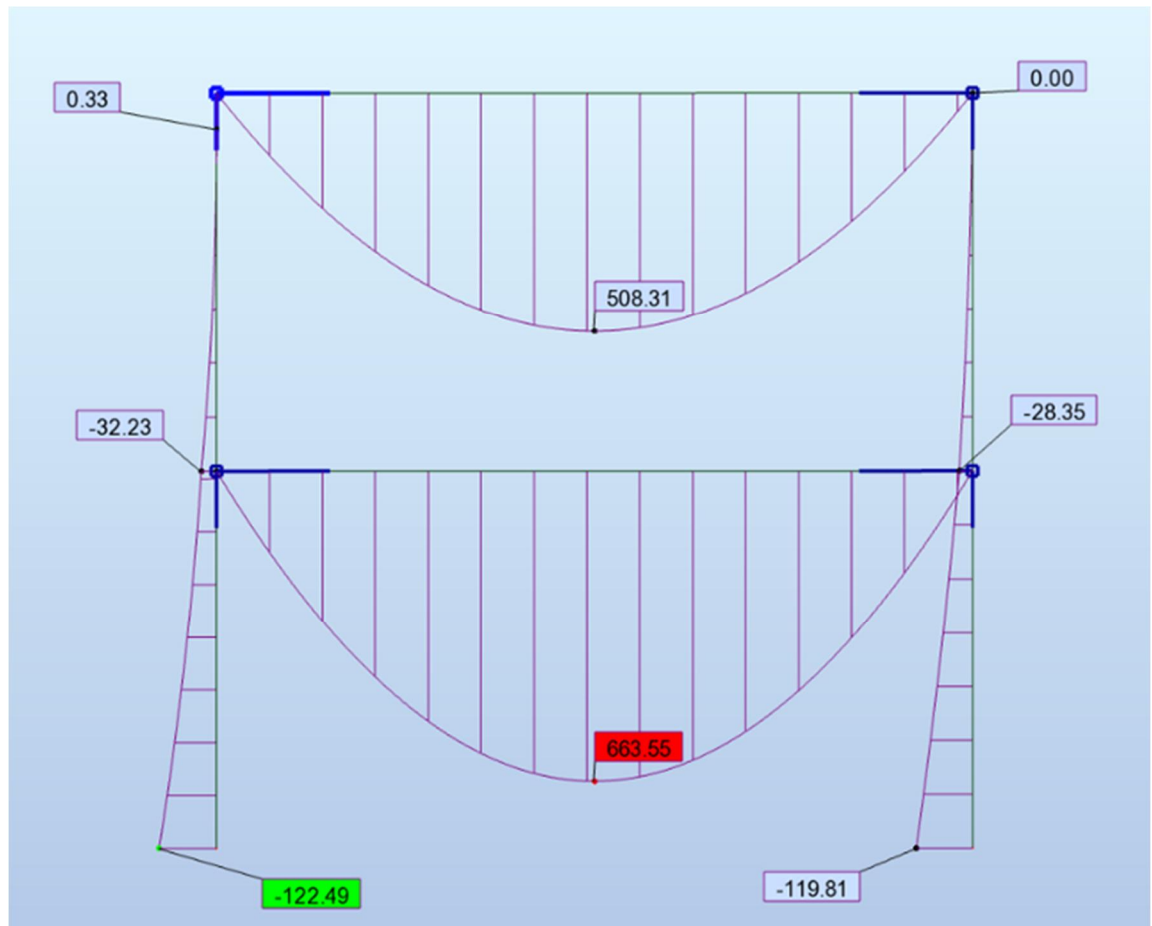
Pilareiden mitoituksessa on oletettu pilareiden olevan sivusuunnassa tuettuja kiepahdukselle ja heikomman suunnan nurjahdukselle palkkien keskilinjan tasolla. Pilareiden liitos perustuksiin oletettiin jäykäksi molempiin suuntiin. Pilareiden nurjahduspituus vahvempaan suuntaan on määritetty Robot-ohjelmalla. Kuvassa 3 on esitetty kehän rakennemalli sekä solmujen ja sauvojen numerointi. Kuvassa 4 on esitetty kehän kuormitukset.



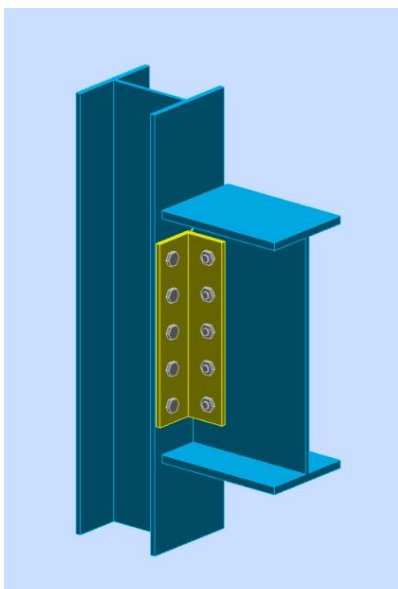
Kuva 4. Kehän kuormitukset.

8.1.1 Nivelellinen rakennemalli

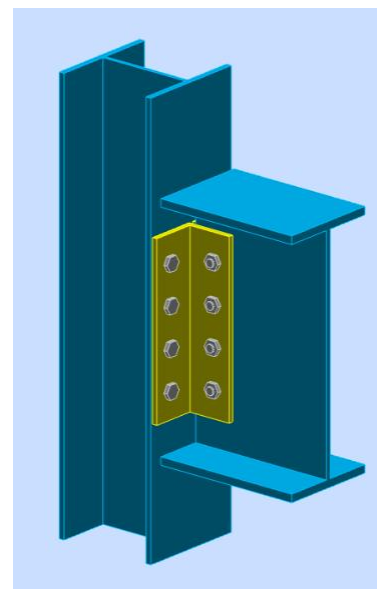
Aluksi rakenne laskettiin ja mitoitettiin olettaen palkkien liitokset pilareihin nivelellisiksi. Tällöin palkkien momentit eivät siirry pilareihin ollenkaan, vaan pilarit ja palkit toimivat toisistaan momenttien suhteen itsenäisesti. Pilareiden nurjahduspituudet vahvempaan suuntaan määritettiin Robot-ohjelmalla. Pilareiden alemman osan nurjahduspituudeksi vahvempaan suuntaan saatiin 3,80m sekä ylemmän osan nurjahduspituudeksi 4,03m. Kuvassa 5 on esitetty näin lasketun kehärakenteen momenttikuvio ja kuvissa 6 ja 7 käytetyt liitokset. Taulukossa 11 on vielä esitetty sauvojen profiilit ja niiden käyttöasteet sekä liitosten käyttöasteet.



Kuva 5. Nivelellisen rakennemallin taivutusmomenttikuvio.



Kuva 6. Alempaan palkin nivelliitos



Kuva 7. Ylempään palkin nivelliitos

Taulukko 11. Nivelellisen rakennemallin profiilien ja liitosten käyttöasteet.

Nivelellisen rakennemallin käyttöasteet			
Pilari 1-2, HEA 220	0,87	Solmu 2	0,69
Pilari 3-4, HEA 220	0,96	Solmu 3	0,83
Palkki 5, IPE 550	0,84	Solmu 5	0,97
Palkki 6, IPE500	0,95	Solmu 6	0,94

Taivutusmomenttikuviosta nähdään että taivutusmomentit jakautuvat sauvoille sauvan kuormitusten mukaan, eikä liitosten kautta momentteja siirry sauvalta toiselle. Tämä on hyvin yleinen ja käyttökelpoinen tapa muodostaa rakenteen laskentamalli. Rakenteen taloudellisuus ei ole aivan paras mahdollinen, mutta kuitenkin hyväksyttävä.

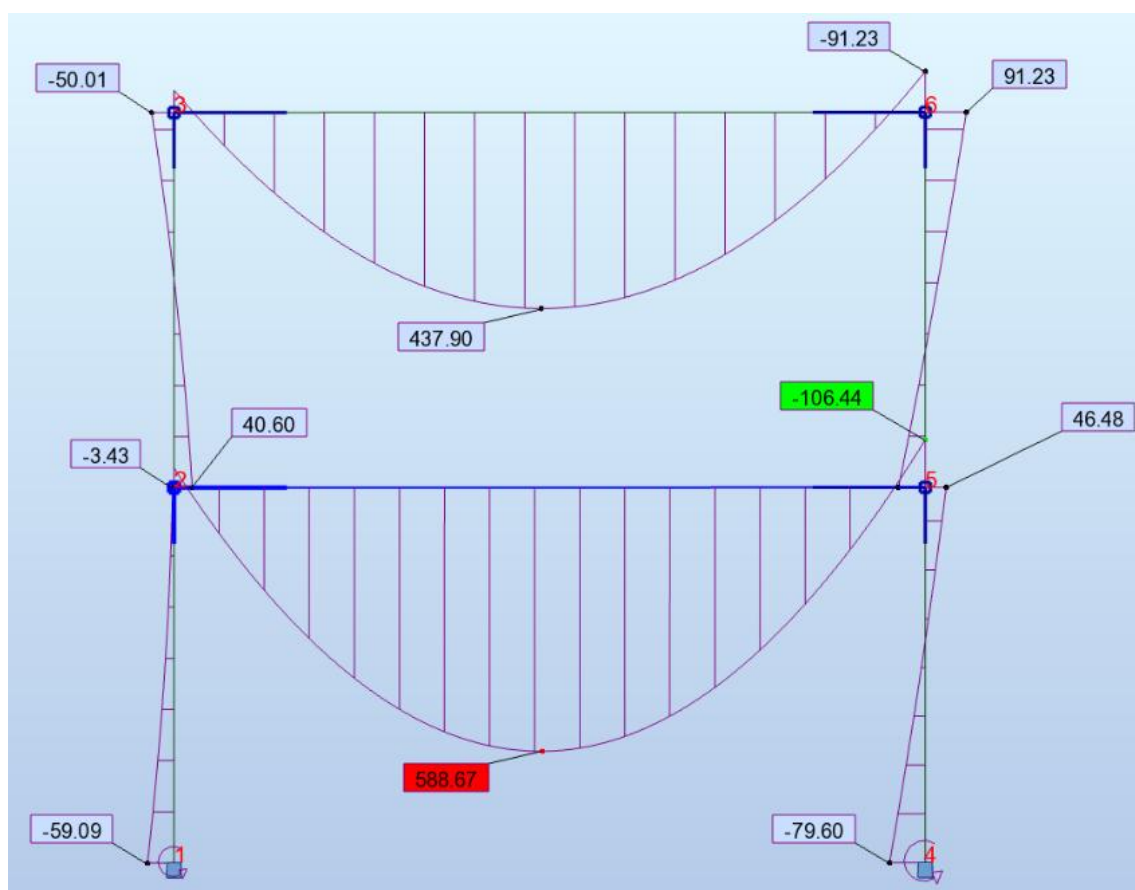
Profiilien kokonaispaino (pilarin pituus 7,0m ja palkin pituus 6,77m) on yhteensä 2035kg. Lisäksi on huomattavaa että liitokset ovat hyvin yksinkertaiset valmistaa eikä niissä tarvitse tehdä hitsauksia ollenkaan.

8.1.2 Joustavien liitosten rakennemalli

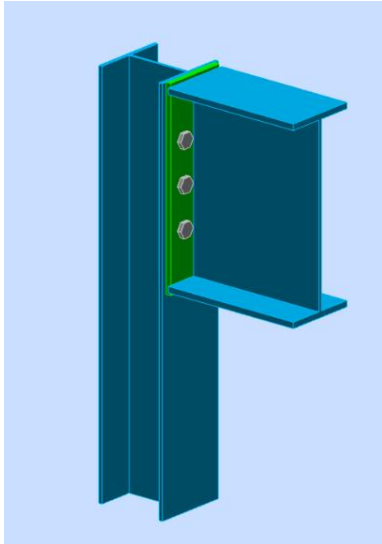
Tässä vaiheessa nivelellistä rakennemallia muutettiin siten, että palkkien liitos pilariin muutettiin päätylevyliitokseksi jossa on jo hieman kiertymäjäykkyyttä. Kiertymäjäykkyytenä rakennemallissa käytettiin jokaisella liitoksella siihen kohdistuvaa taivutusmomenttia vastaavaa kiertymäjäykkyyttä. Tästä seuraa, koska saman palkin eri päissä on erisuuruiset momentit, että liitoksen kiertymäjäykkyys S_j on saman palkin päissä eri suuruinen vaikka liitos on tismalleen samanlainen palkin molemmissa päissä. Alkukier-

tymäjäykyys alemman palkin liitoksille on 24727 kNm/rad ja ylemmän palkin liitoksille 20009 kNm/rad.

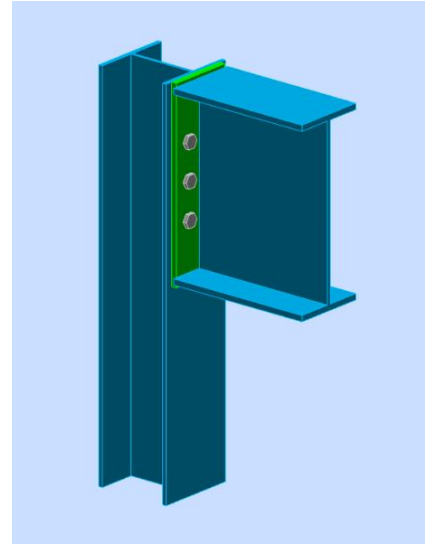
Alemman palkin IPE 550 profiilille vasemman pään kiertymäjäykyys S_j on rakennemallissa 24727kNm/rad ja oikeassa päässä 11798kNm/rad. Ylemmän palkin IPE 500 profiilille vasemman pään kiertymäjäykyys on 20009kNm/rad ja oikean pään 9288kNm/rad. Erilaiset jäykkyydet johtuvat liitoksen momenttikestävyuden käyttöasteista, joka on oikeanpuoleisissa liitoksissa huomattavasti suurempi. Suurempi momentti taas johtuu siitä että koko rakenne taipuu oikealle päin, jolloin liitoksen kiertymä oikeanpuoleisessa palkin ja pilarin välisessä liitoksessa on suurempi kuin vasemmanpuoleisessa liitoksessa. Pilareiden alaosan nurjahduspituudeksi saatiin 3,8m ja yläosan nurjahduspituudeksi 4,03m. Kuvassa 8 on esitetty näin lasketun rakenteen taivutusmomenttikuvio, ja kuvissa 9 ja 10 on esitetty käytettyjen liitosten kuvat. Lisäksi taulukossa 12 on esitetty profiilien käyttöasteet.



Kuva 8. Joustavien liitosten rakennemallin taivutusmomenttikuvio.



Kuva 9. *Alemman palkin joustava liitos*



Kuva 10. *Ylemmä palkin joustava liitos*

Taulukko 12. *Joustavien liitosten rakennemallin profiilien ja liitosten käyttöasteet.*

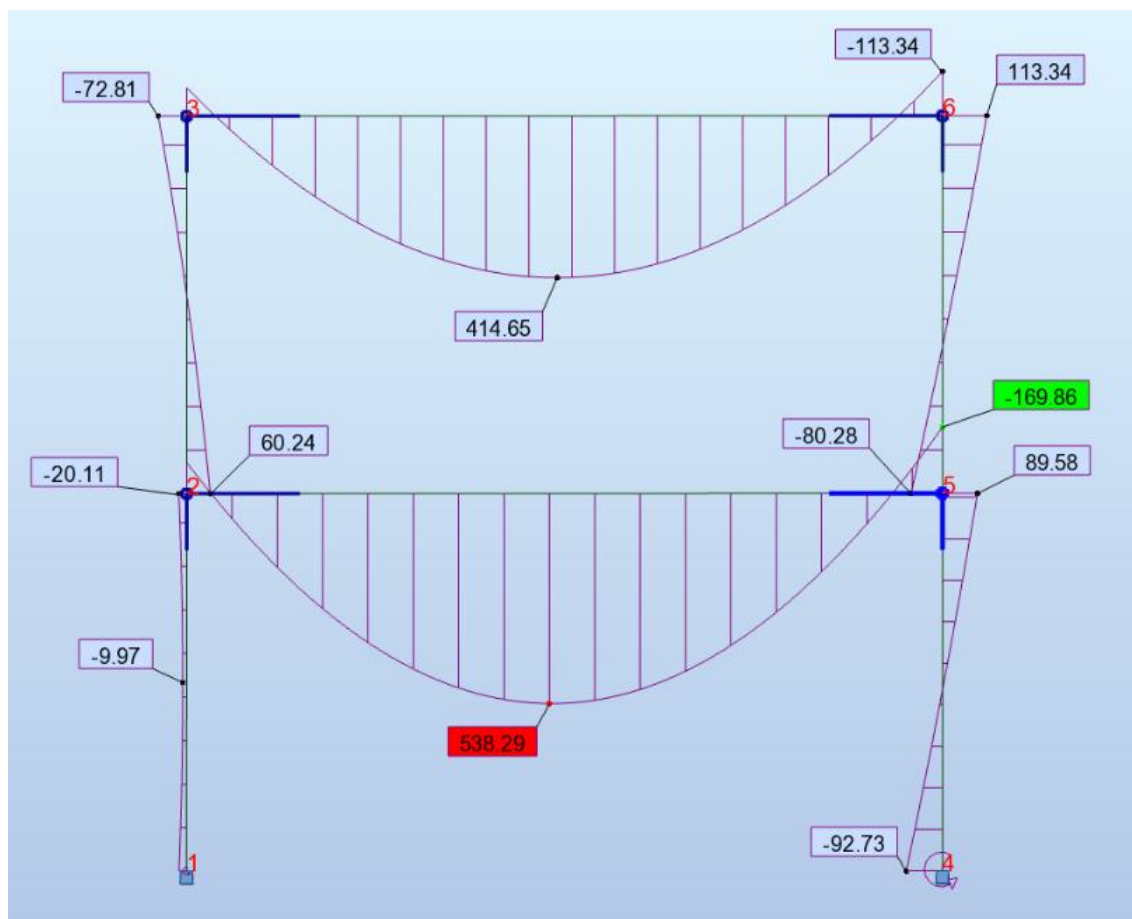
Joustavien liitosten 1 rakennemallin käyttöasteet			
Pilari 1-2, HEA 220	0,66	Solmu 2	0,39
Pilari 3-4, HEA 220	0,76	Solmu 3	0,49
Palkki 5, IPE 550	0,78	Solmu 5	0,88
Palkki 6, IPE500	0,76	Solmu 6	0,89

Taivutusmomenttikuviosta nähdään että liitosten kautta välittyy taivutusmomenttia sauvalta toiselle. Erityisesti pilareiden yläpäässä on taivutusmomenttia, kun taas nivelellisessä mallissa pilareiden päissä ei ole momenttia. Taulukosta taas nähdään että sauvojen käyttöasteet laskivat huomattavasti verrattuna nivelellisen rakennemallin käyttöasteisiin. Käyttöasteiden lasku johtuu momenttien jakautumisesta edullisemmin sauvojen pituusakselille.

Kehä rakenteen profiilien kokonaispaino on 2035kg, ja liitokset ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia valmistaa. Tässä pilariprofiileita ei koitettu optimoida, vaan tuoda esille käyttöasteiden laskeminen siirryttäessä nivelliitoksista joustaviin liitoksiin.

8.1.3 Kehitetty joustavien liitosten rakennemalli

Tässä kohtaa jatkettiin edellä saaduista joustavien liitosten rakennemallista eteenpäin optimoimalla profiileja uusille voimasuureille. Samalla liitosten geometriaa jouduttiin

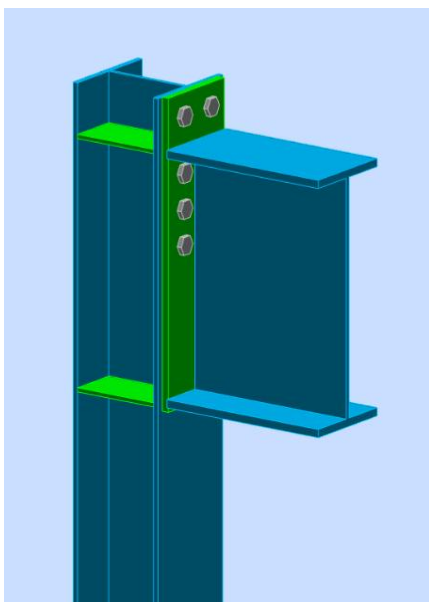


Kuva 11. Kehitetyn joustavien liitosten rakennemallin taivutusmomenttikuvio

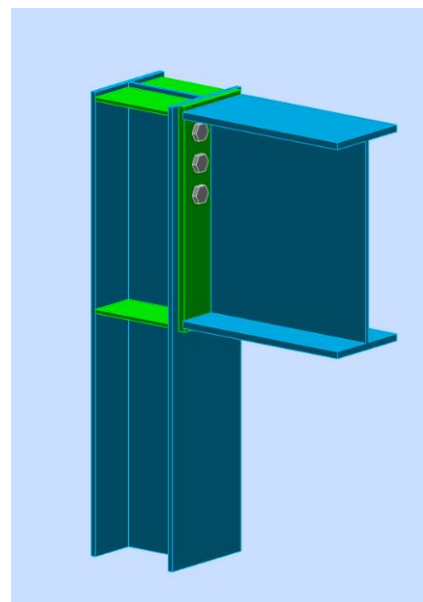
muuttamaan koska alkuperäiset liitokset eivät enää kestäneet pienennetyillä profiileilla laskettuja voimasuureita. Lopputuloksena useammalle eri iteraatiokierrokselle päädyttiin kuvien 11 ja 12 mukaisiin liitoksiin. Kehärakenteen vasemmanpuoleinen pilari on profiililtaan HEA180, oikeanpuoleinen HEA 220. HEA 180:n alemman osan nurjahduspituus vahvempaan suuntaan on 3,7m ja ylemmän osan 3,86m. HEA 220:n alemman osan nurjahduspituus vahvempaan suuntaan on 3,91m ja ylemmän osan 4,23m. Ylempi palkki on profiililtaan IPE 450, alempi palkki on IPE 500.

Kuvassa 11 on esitetty rakenteen taivutusmomenttikuvio. Kuviosta nähdään että palkkien päiden momentit ovat hieman kasvaneet edellisestä laskentaversiosta, joten liitokset ovat jonkin verran jäykempiä. Samoin kuviosta näkee että oikeanpuoleiselle pilarille alkaa kerääntyä liitoksien kautta enemmän momenttia. Tämä siitä huolimatta, että palkkien oikeanpuoleisten liitosten kiertymäjäykkyys laskentamallissa on huomattavasti pienempi kuin vasemmanpuoleisessa päässä.

Kuvissa 12 ja 13 on esitetty käytetyt liitostyyppit. Kuvista näkee että liitokset ovat selvästi jäykempiä kuin edellisessä laskentamallissa. Siitä huolimatta liitosten geometria on melko yksinkertainen. Suurin muutos edellisiin liitoksiin on pilareihin hitsatut jäykistelevyt.



Kuva 11. Alemman palkin liitos pilariin



Kuva 12. Ylemmän palkin liitos pilariin

Alemman palkin liitoksen vasemman pään alkukiertymäjäykkyys $S_{j,ini}$ on 31157 kNm/rad ja vasemman pään $S_{j,ini}$ on 42217 kNm/rad. Ylemmän palkin vasemman pään $S_{j,ini}$ on 26854 kNm/rad ja oikean pään liitoksen $S_{j,ini}$ on 35915 kNm/rad. Laskennassa alemman palkin vasemman pään kiertymäjäykkyys S_j on 31175 kNm/rad ja oikean pään S_j on 17118 kNm/rad. Ylemmän palkin vasemman pään S_j on 19612 kNm/rad ja oikean pään S_j on 22084 kNm/rad. Saman palkin eri päiden alkukiertymäjäykkyys erot johtuvat erilaisista pilaripofiileista, joiden komponentit vaikuttavat kiertymäjäykkyYTEEN. Erot laskennassa käytetyn kiertymäjäykkyys ja alkukiertymäjäykkyys välillä tulevat liitosten erilaisista käyttöasteista, joka taas vaikuttaa laskennassa käytettävään kiertymäjäykkyYTEEN.

Taulukossa 13 on esitetty pilareiden ja liitosten käyttöasteet. Sauvojen profiilit on optimoitu, jolloin rakenteen painoa on saatu pienennettyä huomattavasti. Kehärakenteen profiilien paino on yhteensä 1742 kg liitosten ollessa vielä kohtuullisen yksinkertaisia valmistaa, ja käytetyille kuormille tämä rakenne on jo hyvin optimaalinen ratkaisu.

Taulukko 13. Lopullisen rakennemallin pilareiden ja liitosten käyttöasteet

Lopullisen rakennemallin käyttöasteet			
Pilari 1-2, HEA 180	0,95	Solmu 2	0,58
Pilari 3-4, HEA 220	0,83	Solmu 3	0,72
Palkki 5, IPE 500	0,92	Solmu 5	0,88
Palkki 6, IPE450	0,97	Solmu 6	0,80

8.1.4 Täysin jäykkä rakennemalli

Tässä vaiheessa kehärakenne laskettiin olettaen kaikki liitokset täysin jäykiksi. Tällöin saatiin pilareiden nurjahduspituudeksi vahvempaan suuntaan alemmassa kerroksessa 4,24m ja ylemmässä kerroksessa 4,89m.

Jotta laskentamallissa voidaan käyttää oletuksena liitosten olevan jäykkiä, tulee alemman palkin liitoksen täyttää kaavan (20) kiertymäjäykkyyksivaatimus.

$$S_{j,ini} \geq 25 \times EI_b/L_b \quad (20)$$

$$S_{j,ini} \geq 25 \times 210000 \frac{N}{mm^2} * 337400000mm^4/7000mm \quad (21)$$

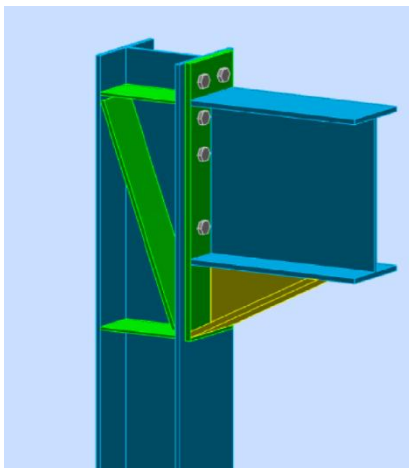
$$S_{j,ini} \geq 253050kNm/rad \quad (22)$$

Vastaavasti ylemmän palkin liitoksen kiertymäjäykkyyden tulee täyttää kaavan (23) ehto.

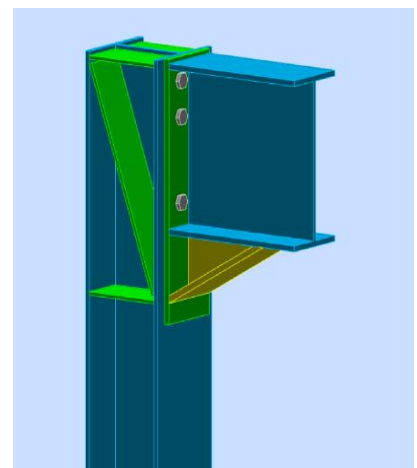
$$S_{j,ini} \geq 25 \times 210000 \frac{N}{mm^2} * 231300000mm^4/7000mm \quad (23)$$

$$S_{j,ini} \geq 173475kNm/rad \quad (24)$$

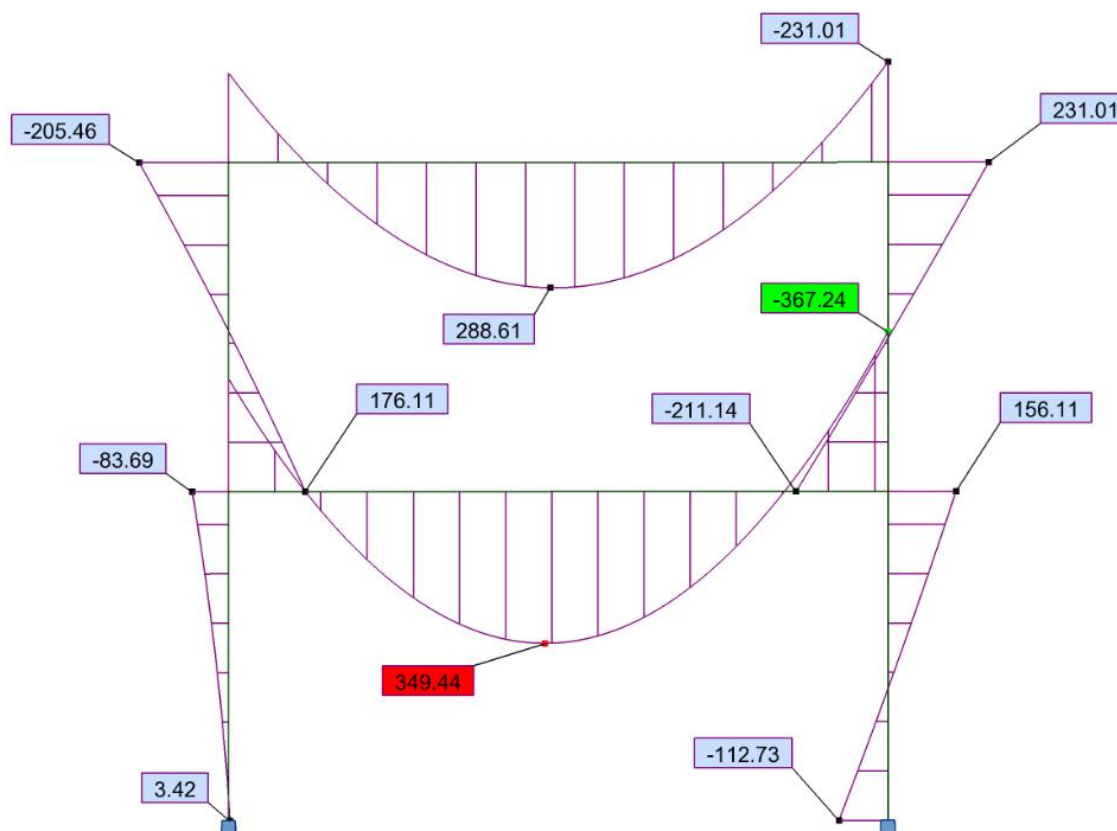
Kuvissa 13 ja 14 on esitetty laskennassa käytetyt liitostyyppit. Kuvan 13 liitos on alemman palkin liitos pilariin (solmut 2 ja 5). Sen alkukiertymäjäykkyys $S_{j,ini}$ on 264260 kN*m/rad, kun vaatimus täysin jäykälle liitokselle on 253050 kN*m/rad. Kuvan 14 liitos on ylemmän palkin liitos pilariin (solmut 3 ja 6). Sen kiertymäjäykkyys $S_{j,ini}$ on 181210 kN*m/rad, kun vaatimus täysin jäykälle liitokselle on 173475kN*m/rad.



Kuva 13. Alemman palkin jäykkä liitos pilariin.



Kuva 14. Ylemmän palkin jäykkä liitos pilariin



Kuva 15. Jäykällä liitoksilla lasketun rakennemallin taivutusmomenttikuvio

Kuvassa 15 on esitetty kehärakenteen taivutusmomenttikuviot, kun rakenne on laskettu täysin jäykällä liitoksilla. Palkkien päiden momentit ovat huomattavasti suuremmat kuin joustavien liitosten malleissa.

Taulukossa 14 on esitetty profiilien ja liitosten käyttöasteet täysin jäykkien liitosten kehässä. Käyttöasteista nähdään että rakenne kestää laskentakuormat ja on siis kelvollinen vaihtoehto. Tässä on huomioitava että jäykän liitoksen kiertymäjäykkyyden alaraja on annettu arvolle $S_{j,ini}$. Jos rajat olisi annettu laskennassa käytettävälle arvolle S_j , pitäisi liitosten olla vielä huomattavasti jäykempiä jotta ne täyttäsivät vaaditun kiertymäjäykkyyksvaatimuksen.

Taulukko 14. Profiilien ja liitosten käyttöasteet

Jäykän rakennemallin käyttöasteet			
Pilari 1-2, HEA 220	0,87	Solmu 2	0,69
Pilari 3-4, HEA 220	0,96	Solmu 3	0,83
Palkki 5, IPE 450	0,84	Solmu 5	0,97
Palkki 6, IPE 400	0,95	Solmu 6	0,94

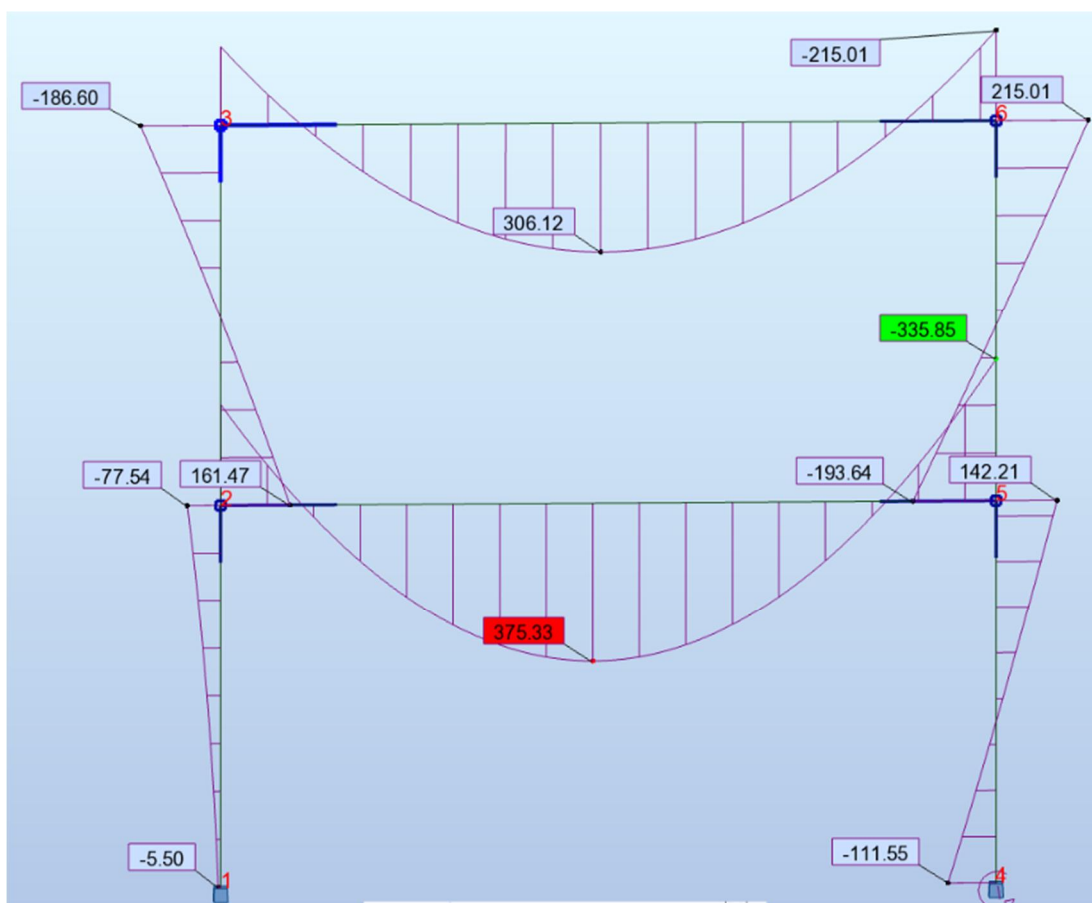
Kehärakenteen profiilien paino on yhteensä 1679kg, joka on 356kg vähemmän kuin nivelellisillä liitoksilla laskettun kehärakenteen paino. Painoero kehitettyyn joustavien

liitosten malliin on vain 63kg. Jos liitososien paino huomioitaisiin, olisi tämä malli jonkin verran painavampi kuin kehitetty joustavien liitosten malli. Lisäksi liitoksien geometriasta nähdään että erilaisia hitsattavia osia on melko paljon, jolloin liitosten valmistuskustannukset todennäköisesti ovat melko suuret.

8.1.5 Täysin jäykkä rakennemalli, jossa käytetty todellisia kiertymäjäykkyyksiä liitoksille

Tässä vaiheessa kokeiltiin vielä laskea täysin jäykkä kehärakenne läpi käyttäen alun perin jäykille liitoksille niiden todellista kiertymäjäykkyyttä. Laskentamallissa alemman palkin vasemman pään kiertymäjäykkyytenä S_j on 264260kNm/rad ja oikean pään 122479kNm/rad. Ylemmän palkin vasemman pään kiertymäjäykkyyks on 129062kNm/rad ja oikean pään 88589kNm/rad

Kuvassa 16 on esitetty näin lasketun kehän taivutusmomenttikuvio. Kuviosta nähdään että erot täysin jäykän mallin taivutusmomenttikuvioon ovat melko pienet, vaikka kiertymäjäykkyyks laskentamallissa onkin pienempi.



Kuva 16. Kehärakenteen taivutusmomenttikuvio

Taulukossa 15 on esitetty sauvojen ja liitosten käyttöasteet. Käyttöasteista havaitaan että kaikkien liitosten käyttöasteet hieman pienenevät, joka selittyy liitosten joustavuudella

jolloin niihin kehittyy vähemmän momenttia. Pilareiden käyttöasteet pienenevät myös, kun niille siirtyy vähemmän palkkien taivutusmomenttia. Molemmissa palkeissa taivutusmomentit kasvoivat vastaavasti hieman, jolloin niiden käyttöasteetkin kasvoivat hieman.

Taulukko 15. Kehärakenteen profiilien ja liitosten käyttöasteet.

Toisen laskentavaiheen käyttöasteet			
Pilari 1-2, HEA 240	0,80	Solmu 2	0,63
Pilari 3-4, HEA 240	0,91	Solmu 3	0,76
Palkki 5, IPE 450	0,85	Solmu 5	0,89
Palkki 6, IPE 400	0,99	Solmu 6	0,87

9. YHTEENVETO

Liitosten suunnittelu on vaativa prosessi, joka vaatii suunnittelijalta huomattavan suurta määrää osaamista lujuusopin, rakenteiden mekaniikan ja standardien osalta. Pelkästään liitoskomponenttien suunnittelu kestämiin annetuille voimasuureille vaatii hyvin paljon osaamista. Kuitenkaan pelkkä liitosten kestävyysvarmistaminen ei riitä, vaan suunnittelija joutuu samalla miettimään liitosten vaikutusta koko rakenteeseen. Lisäksi tulee huomioida standardien asettamat vaatimukset käytettäville materiaaleille ja tuotteille. Useimmiten koko rakenne analysoidaan lineaariseen kimmoteoriaan perustuen, joten tässä keskitytään vain siihen perustuvaan koko rakenteen laskentaan.

Erityishuomiota suunnittelijan tulee kiinnittää liitosten kiertymäjäykkyyteen ja kiertymäjäykkyyden vaikutusta koko rakenteen analyysimallin luomiseen. Aiemmin on todettu että osittain jäykkien liitosten mallintaminen koko rakenteen analyysimallissa nivellisinä on hyväksyttävä tapa toimia, kunhan varmistutaan liitosten sitkeydestä ja muodonmuutoskyvystä.

Huomionarvoinen seikka on myös liitoksen alkukiertymisjäykkyyden ja laskentamallissa käytettävän kiertymisjäykkyyden suuret erot. Taulukossa 16 on esitetty alemman palkin liitosten alkukiertymäjäykkyydet sekä laskentamallissa käytettävät kiertymäjäykkyydet ja taulukossa 17 ylemmän palkin vastaavat arvot. Tässä laskentamallissa käytetty kiertymisjäykkyys on laskettu lähteen [3] kohdan 6.3 mukaan.

Taulukko 16. Alemman palkin liitosten kiertymäjäykkyydet.

Liitostyyppi	Palkin pää	Alkukiertymäjäykkyys $S_{j,ini}$, [kNm/rad]	Laskentamallissa käytetty kiertymäjäykkyys S_j , [kNm/rad]	$S_j/S_{j,ini}$
Nivel	Molemmat	0	0	-
Joustava	Vasen	24727	24727	1.00
	Oikea	24727	11798	0.48
Kehitetty joustava	Vasen	31157	31157	1.00
	Oikea	42217	17118	0.41
Jäykkä	Kaikki	∞	∞	-
Jäykkä, todellinen jäykkyys	Vasen	264260	264260	1.00
	Oikea	264260	122479	0.46

Laskentamallissa alemman palkin vasemman pään kiertymäjäykkyytenä S_j on 264260kNm/rad ja oikean pään 122479kNm/rad. Ylemmän palkin vasemman pään kiertymäjäykkyys on 129062kNm/rad ja oikean pään 88589kNm/rad

Taulukko 17. Ylemmän palkin liitosten kiertymäjäykkyydet.

Liitostyyppi	Palkin pää	Alkukiertymä- jäykkyys $S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Laskentamallissa käytet- ty kiertymäjäykkyys S_j , [kNm/rad]	$S_j/S_{j,ini}$
Nivel	Molemmat	0	0	-
Joustava	Vasen	20009	20009	1.00
	Oikea	20009	9288	0.46
Kehitetty joustava	Vasen	26854	19612	0.73
	Oikea	35915	22084	0.61
Jäykkä	Kaikki	∞	∞	-
Jäykkä, todellinen jäykkyys	Vasen	181210	129062	0.71
	Oikea	181210	88589	0.49

Taulukoista nähdään että liitosten laskentamallissa käytettävä kiertymäjäykkyys saattaa olla huomattavasti pienempi kuin liitoksen alkukiertymäjäykkyys. Samalla saman palkin eri päissä käytettävät kiertymäjäykkyydet voivat olla suuruudeltaan hyvin erilaiset. Yksinkertaisempaan rakennemalliin päästään jos rakennemallissa käytettävä kiertymäjäykkyys lasketaan jakamalla alkukiertymäjäykkyys muunnostekijällä η (kts. [3], taulukko 5.2).

Liitosten kiertymäjäykkyyden huomioiminen koko rakenteen analyysimallissa joustavina liitoksina antaa suunnittelijalle kuitenkin mahdollisuuden huomattaviin kustannussäästöihin. Joustavia liitoksia käytettäessä on kehä rakenteen taivutusmomenttien jakautumaa mahdollista muokata koko rakenteen kannalta edullisempaan muotoon, jolloin pystytään käyttämään kevyempiä profiileja. Joustavien liitosten geometria on melko yksinkertaista verrattuna täysin jäykkiin liitoksiin. Nivelliitoksiin verrattuna joustavien liitosten geometria on jonkin verran vaativampaa. Suunnittelija joutuukin tapauskohtaisesti harkitsemaan onko joustavien liitosten käyttäminen taloudellisesti järkevää.

Taulukossa 16 on esitetty eri liitostyyppjä käyttäen lasketun esimerkkikehän optimoidut profiilien kokonaispainot. Taulukosta nähdään että profiilien kokonaispaino saatiin pienimmäksi käyttäen täysin jäykkiä liitoksia. Toisaalta täysin jäykkien liitosten liitoslevyjen paino on niin suuri että koko rakenteen kokonaispaino nousee korkeammaksi kuin kehitetyillä joustavilla liitoksilla laskettu rakenne. Taulukkoon ei ole otettu ensimmäistä versiota joustavien liitosten rakennemallista koska siinä vaiheessa profiileja ei optimoitu.

Joustavilla liitoksilla saavutettava koko rakenteen profiilien painosäästö on 14 % verrattuna nivelelliseen rakenteeseen. Tämä on teräsrakenteissa huomattavan suuri lukema. Kun otetaan huomioon joustavien liitosten melko yksinkertainen geometria, pieni liitososien lukumäärä sekä liitosten yksinkertainen valmistettavuus, eivät liituskustannukset eivät merkittävästi kasva verrattuna nivelliitoksiin. Näin ollen voidaan joustavien liitosten käytöllä suunnitella optimaalisia rakenteita.

Taulukko 18. Eri liitostyypeillä laskettujen kehärakenteiden profiilien kokonaispainot ja suhteelliset erot kokonaispainoissa.

Kehärakenteen liitokset	Profiilien kokonaispaino, [kg]	Suhteellinen kokonaispaino
Nivelliitos	2035	1.00
Kehitetty joustava liitos	1742	0.86
Jäykkä liitos	1679	0.83

Esimerkkinä lasketun kehärakenteen rajoituksena on että laskennassa on huomioitu vain yksi kuormitusyhdistelmä. Normaalisti rakenteissa on lähes aina eri kuormitusyhdistelmät joissa vaakavoimat vaikuttavat eri suuntiin. Nyt lasketussa tapauksessa, kun vaakavoimaa on vain toiseen suuntaan, tulee toisen reunan pilarista suurempi verrattuna kehhään jossa olisi kuormitusyhdistelmä jossa vaakavoima vaikuttaa toiseen suuntaan. Toisaalta nyt lasketulla rakenteella saatiin esiin saman liitostyyppin hyvin erisuuruinen laskennassa käytettävä kiertymäjäykkyys, joka riippuu liitoksen käyttöasteesta. Samalla voitiin todeta että esimerkin kehärakenteella saman palkin eri päissä liitoksien kiertymät ovat erisuuret. Kiertymäerot johtuvat pilareiden taipumasta samaan suuntaan, jolloin toisessa päässä palkkia pilarin taipuma pienentää liitoksen kiertymää ja toisessa päässä palkkia liitoksen kiertymä kasvaa.

Kehärakenteen tutkiminen eri liitostyypeillä tuo kiistatta esiin joustavien liitosten käytön edut, ja suunnittelijoiden kannattaa harkita niiden käyttöä aloittaessaan teräsrungon suunnittelua. Osalle suunnittelijoista tämä saattaa ennakkoasenteiden vuoksi olla vaikeaa. Asiaan perehtymällä voidaan kuitenkin huomata että joustavat liitokset eivät ole erityisen vaativia ja hankalia suunnitella, vaan ne tarjoavat teräsrakentamisessa enemmänkin mahdollisuuden toteuttaa taloudellisempia rakenteita.

LÄHTEET

- [1] Diplomityöohje, Tampereen teknillisen yliopiston ohjeet [intranet], Tampere, 2013. Saatavissa: <https://www.tut.fi/pop> > Opiskelu > Diplomityö > Diplomityöohje
- [2] SFS-EN 1090-2, Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012, 198s.
- [3] Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8:Liitosten mitoitus. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2005, 198s.
- [4] SFS-EN 15048-1, Esijännittämättömät kantavien rakenteiden ruuviliitokset. Osa 1:Yleiset vaatimukset. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2007, 48s.
- [5] J. Haapio, T.Jokinen, M. Heinisuo, Cost simulations for steel frames with semi-rigid joints using product model techniques. Eurosteel 2011, 6s. Haapio, Jokinen, Heinisuo.
- [6] J.P. Jaspart, J.F. Démonceau, S. Renkin, M.L. Guillaume, European Recommendations for the Design of Simple Joints on Steel Structures. ECCS, 2009, 90s.